MARZO - ABRIL 2020

INGENIERÍA E INDUSTRIA

DYNA

ENGINEERING AND INDUSTRY

113 - 224 | 95 | Nº 2

DYNA

ingeniería e industria #2 | www.revistadyna.com | Año 95 | Nº2 | Marzo - Abril 2020

Texturizado por rectificado para reducir la fricción

Aislamiento acústico entre particiones interiores de edificios

Anclajes con composites para refuerzos estructurales

Utilización como granalla de escorias siderúrgicas

Predicción de la distorsión en el mecanizado

Revista de Ingeniería Multidisciplinar con factor de impacto en JCR
ISSN 0012-7361 | DOI: 10.6036/DYNAII | SICI: 0012-7361(20200301)95:2<>1.0.TX;2-7 | CODEN: DYNAAU



DYNA Management
DOI: 10.6036/DYNAMN
ISSN: 2340-6585
https://www.dyna-management.com

CONSIDERE ENVIAR SU PRÓXIMO ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN A ESTA REVISTA

DYNA Management es una revista digital científica perteneciente a la editorial Publicaciones DYNA SL – **https://www.dynapubli.com**

Desde 2013, DYNA Management publica trabajos de investigación originales en los campos de la gestión de organizaciones: Liderazgo, Dirección de Operaciones, Estratégica, RR.HH., Marketing, etc.

BENEFICIOS PARA EL AUTOR:

- Reducidos plazos de publicación: 2 meses de media desde el inicio del proceso de evaluación
- Riguroso proceso de revisión entre pares, con propuestas de mejoras realizadas por expertos
- Audiencia objetivo especializada
- Alta visibilidad internacional

BUSCAMOS ARTÍCULOS EN LAS ÁREAS DE:

- Dirección de Operaciones
- Gestión Financiera
- Recursos Humanos
- Marketing y Ventas
- Liderazgo
- Motivación

La Revista DYNA es el Órgano Oficial de Ciencia y Tecnología de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España (FAIIE).
Revista científica convenida con la Asociación Española de Ingeniería Mecánica (AEIM).

Fundada en 1926, DYNA es una de las revistas de ingeniería más influyentes y prestigiosas del mundo, como lo reconoce Thomson-Reuters en la edición anual de su informe JCR. Es el medio más indicado para la comunicación de los Ingenieros Industriales Superiores y de cuantos vean en ella el medio de expresión de sus ideas y experiencia.

DYNA es una revista bimestral que edita 6 números al año: enero, marzo, mayo, julio, septiembre, noviembre.

En el número de noviembre de cada año se publican los índices acumulativos por materias y autores de los artículos publicados en el año.

La entidad editora Publicaciones DYNA también publica otras 3 revistas especializadas: DYNA Energía y Sostenibilidad (www.dyna-energia.com), DYNA Management (www.dyna-management.com) y DYNA New Technologies (www.dyna-newtech.com).

http://www.revistadyna.com **dyna@revistadyna.com**

CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN

Presidente de Honor: **Luis Manuel Tomás Balibrea** (FAIIE - Madrid)
Presidente: **Luciano Azpiazu Canivell** (Asociación de Bizkaia - Bilbao)
Vicepresidente: **Esteban Fernández-Rico** (Asociación de Asturias - Oviedo)
Secretario-no consejero: **Carlos López de Letona Ozaita** (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

Vocales:
José Antonio Arvide Cambra (Asociación de Andalucía Oriental – Granada), **Manuel Villalante LLauradó** (Asociación de Catalunya - Barcelona), **Germán Ayora López** (Asociación de Andalucía Occidental – Sevilla), **Francisco Cal Pardo** (Asociación de Madrid – Madrid), **Manuel Lara Coira** (Asociación de Galicia – Santiago), **Luis Soriano Bayo** (Asociación de Aragón), **José Antonio Muñoz Argos** (Asociación de Cantabria – Santander).

PARTICIPES

Asociación de Bizkaia, Asociación de Madrid, Asociación de Cataluña, Asociación de Cantabria, Asociación de Galicia, Asociación de Asturias, Asociación de Aragón, Asociación de Andalucía Occidental, Asociación de Andalucía Oriental, Asociación de la Comunidad Valenciana, Asociación de la Región de Murcia, Colegio de Alava, Colegio de Gipuzkoa, Colegio de Navarra, Asociación de La Rioja, Asociación de Extremadura, Asociación de Albacete, Asociación de Canarias Occidental, Asociación de Canarias Oriental, Asociación de Baleares, Asociación de León.

CONSEJO DE REDACCIÓN

Presidente: **Ignacio Fernández de Aguirre Guantes** (Instituto de Fundición Tabira – Durango)
Vicepresidente: **Néstor Goicoechea Larracoechea** (Universidad del País Vasco - Bilbao)
Secretario: **Carlos López de Letona** (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

Vocales:
Alfonso Parra Gómez (Asociación de Bizkaia – Bilbao), **Angel Arcos Vargas** (Universidad de Sevilla - Sevilla), **Eduardo Valle Peña** (Asociación de Cantabria – Santander), **Franck Girot** (Ecole Nationale Superieure d´Arts et Metiers – Paris, Francia), **Angel Mena Nieto** (Universidad de Huelva - Palos de la Frontera), **José Manuel Palomar Carnicero** (EPS Jaén – Jaén), **José María Bueno Lidón** (Green Power Tech – Sevilla), **José Rafael Castrejón Pita** (Queen Mary University of London – London, UK), **Manuel Lara Coira** (Escuela Politécnica Superior de Ferrol – Ferrol), **Nicolás Gaminde Alix** (Asociación de Bizkaia – Bilbao), **Mikel Sorli Peña** (Asociación de Bizkaia – Bilbao), **Luis Maria Abadie** (Basque Center for Climate Change - Bilbao), **Pere Alavedra Ribot** (Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona).

CONSEJO ASESOR

Alberto Del Rosso (Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires, Argentina), **Allan Joseph Wailoo** (Universidad de Sheffield - Sheffield, UK), **Fernando Guijarro Merelles** (Universidad de Extremadura – Cáceres), **Fernando López Rodriguez** (Agencia Extremeña de la Energía – Cáceres), **Roberto Uribeetxeberria** (Universidad de Mondragón - Mondragón), **Eva Martínez Caro** (Universidad Politécnica de Cartagena - Cartagena), **Javier Santos García** (Universidad de Navarra - San Sebastjan), **J. Angel Menéndez Diaz** (INCAR-CSIC - Oviedo, España), **Jorge Arturo Del Angel Ramos** (Universidad Veracruzana - Veracruz, México), **Juan M. Gers** (Gers USA LLC – Weston, Florida, USA), **Ricardo Rodríguez Jorge** (Universidad Tecnológica de Ciudad Juarez - Juarez, México), **Erik Ocaranza Sánchez** (Instituto Politécnico Nacional - Tlascala, México), **Joshué Manuel Pérez Rastelli** (Tecnalia - Bilbao, España) - **Lina Montuori** (Universidad de Nueva York - Buffalo, USA), **Jacques Mercadier** (UISBA - Pau, Francia), **Noelia Fernández Díaz** (NaCOM Energy - Agotnes, Noruega), **Luis Alfonso Fernandez Serantes** (Universidad FH JOANNEUM - Graz, Austria), **Jose L Fernández Solís** (Texas A&M University - College Station, Texas, USA), **Maria Cristina Rodriguez Rivero** (University of Cambridge - Cambridge, UK), **Francisco Cavas Martínez** (Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena), **Nadia Rego Monteil** (Queen's University - Ottawa, Canada), **Victor Petuya Arcocha** (Asociación Española de Ingeniería Mecánica - Madrid), **Antonio Sánchez Egea** (Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica - Zamudio, España), **Jaime R. Santos Reyes** (IPN-Zacaténco, México), **Daniel Martinez Krahmer** (Instituto Nacional de Tecnología Industrial - Buenos Aires, Argentina), **José Luis Endrino** (Cranfield University - Cranfield, United Kingdom), **Manuel Paredes** (INSA Toulouse - Toulouse, Francia), **Pablo Pujadas Alvarez** (Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España), **Paolo Cicconi** (Università Politecnica delle Marche - Ancona, Italia), **Pedro Martí Gómez-Aldaraví** (Universidad Politécnica de Valencia - Valencia, España), **Francisco Campuzano Bolarín** (Universidad Politécnica de Cartagena - Cartagena, España).

© 2020. Publicaciones DYNA S.L.
Publicaciones DYNA SL, a los efectos previstos en el artículo 32.1 párrafo segundo del vigente TRLPI, se opone expresamente a que cualquiera de las páginas de esta obra o partes de ella sean utilizadas para la realización de resúmenes de prensa. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra (http://www.conlicencia.com; +34 917 021970 / +34 932 720447).

Las opiniones y datos reflejados en los contenidos son de exclusiva responsabilidad de los autores.

IMAGEN DE PORTADA:

Cortesía de IK4-Ideko e Universidad del País Vasco UPV/EHU (paper 9385)

ENTIDAD EDITORA:

Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España

ADMINISTRACIÓN, DIRECCIÓN, DISTRIBUCIÓN, EDICIÓN, PEDIDOS, PUBLICIDAD Y SUSCRIPCIONES:

Publicaciones DYNA S.L.
www.dynapubli.com
Alameda de Mazarredo, 69 - 48009 BILBAO.
Tel. +34 944 237566 - Fax +34 944 234461
email: dyna@revistadyna.com
Instrucciones detalladas para los autores en la web: www.revistadyna.com

IMPRESOR: MCCGRAPHICS

C/ Larrondo Beheko Etorbidea, edif. 4 Nave 1 - 48180 LOIU (Vizcaya) -
Tel.: +34 944 535 205. e-mail: elkar@mccgraphics.com
Formato: 21 x 29,7 cm (A4)
D.L. BI-6-1958
ISSN 0012-7361
ISSN electrónico 1989-1490
SICI: 0012-7361(20200301)95:2<>1.0.TX;2-7
CODEN: DYNAAU
DOI: 10.6036/DYNAII

Tirada de este número: 3.867 (papel) y 38.918 (digital)
Ejemplares vendidos: 3.697 (papel) y 38.902 (digital)

UNIVERSIDADES COLABORADORAS

Universidad del País Vasco, Universidad de la Coruña, Universidad de Vigo, Universidad Carlos III, Universidad de Oviedo, Universidad de Navarra (Tecnun), Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de Mondragón, Universidad de Gerona, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad Miguel Hernandez, Universidad Rovira i Virgili, Universidad de Huelva, Universidad Sancti Spiritus.

ORGANIZACIONES COLABORADORAS

CEIT-IK4, Euskalit, Tecnalia, ITEC, ITE, CTM, AIMEN, Gaiker-IK4, IAT, CIATEC, Ingegraf

ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

Bodegas Muriel

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:
- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

Suscripción anual Institucional

España ..... 217,00 €
Extranjero ..... 268,65 €
Suscripción WEB ilimitada al archivo histórico ..... a consultar
Precio por ejemplar ..... 37,00 €
Los ejemplares se envían por correo ordinario y su precio incluye los gastos de envío.
Para suscripciones, pedidos, reclamaciones, renovaciones, cancelaciones o cambios de domicilio enviar un correo electrónico a dyna@revistadyna.com indicando el motivo del mensaje, la identificación de la persona o entidad, NIF o CIF, dirección postal, teléfono y correo electrónico.
Existe un formulario de suscripción en nuestra página web:
http://www.revistadyna.com

Tarifas publicitarias

(Estos precios no incluyen el 21% de IVA)

Revista Impresa	**Izda.**	**Dcha.**
Página a color	1.036 €	1.183 €
1/2 página a color (Horizontal o vertical)	675 €	800 €
1/4 página a color (Horizontal o vertical)	427 €	492 €
Interior Portada		1.224 €
Interior Contraportada		1.061 €
Contraportada		1.275 €
Encartes y Publireportajes		a consultar
Revista digital (http://www.revistadyna.com)		
Banner web lateral de 245x60 pixels (mín. 7 dd)		15 €/día
Banner web superior de 620x95 pixels (mín. 7 dd)		50 €/día
Inserción en Boletín electrónico		a consultar

Páginas visitadas al mes: 30.000 (Google Analytics)
Nuestro formato impreso es A4 a todo color (21 x 29,7 cm)
El material digital original será por cuenta del anunciante. Los anuncios con indicación del lugar de colocación tendrán un aumento del 25%.

Incluida en / Indexed in

MICROSOFT ACADEMIC (Microsft Coporation)
https://academic.microsoft.com
DIALNET (Universidad de La Rioja)
http://dialnet.unirioja.es
GEOREF (American Geological Institute)
http://www.agiweb.org
GOOGLE SCHOLAR
http://scholar.google.es
INDICES CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)
https://indices.csic.es
Journal Citation Reports (Clarivate Analytics)
http://science.thomsonreuters.com/es/productos/jcr
CATÁLOGO 2.0 LATINDEX (Sistema Regional de Información en linea para Iberoamérica)
http://www.latindex.org
PASCAL (Centre National de la Recherche Scientifique)
http://www.inist.fr
RECYT (Fundación Española de la Ciencia y Tecnología)
http://recyt.fecyt.es
SCIENCE CITATION INDEX EXPANDED (Clarivate Analytics)
http://www.thomsonscientific.com
SCOPUS (Grupo Elsevier)
http://info.scopus.com
CIRC (EC3metrics)
https://www.clasificacioncirc.es/
TECHNOLOGY RESEARCH DATABASE (ProQuest)
http://www.proquest.com
ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY (Grupo Elsevier)
http://ulrichsweb.com

BOLETIN DE SUSCRIPCIÓN:

*Nombre y 2 apellidos ..... Empresa .....

* NIF / CIF ..... *Dirección de envío suscripción .....

*CP ..... *Población ..... *Provincia .....

*Teléfono ..... Móvil ..... Fax .....

E-mail ..... Web .....

Fecha ..... Fecha Firma y Sello

FORMA DE PAGO SELECCIONADA:

❑ Transferencia ❑ Cheque nominativo ❑ Domiciliación bancaria

Ruego a Uds. que con cargo a cta./libreta: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
Entidad Agencia D.C. País Oficina

Domicilio Sucursal ..... Cod.Postal ..... Población ..... Titular .....

Atiendan hasta nuevo aviso los recibos que presente Publicaciones DYNA SL.

Remitir este boletín de suscripción o sus datos por:

CORREO POSTAL:	**CORREO ELECTRÓNICO:**	**FAX:**	**PÁGINA WEB:**
Publicaciones DYNA SL Alda. Mazarredo 69 – 4º 48009-Bilbao	dyna@revistadyna.com	+34 94 423 44 61	http://www.revistadyna.com Donde existe un formulario de suscripción

*Los campos señalados con un * son obligatorios, y por tanto necesarios para atender su petición.*
En cumplimiento de lo establecido en la LOPD 15/1999, le informamos y en este sentido usted consiente, que los datos personales, que nos facilite, sean tratados y queden incorporados en los ficheros de PUBLICACIONES DYNA SL, para el envío periódico de la revista Dyna, sus datos no serán objeto de cesión alguna. En el caso de que no dé su consentimiento para el tratamiento de sus datos, será imposible prestar correctamente los servicios solicitados. Usted además consiente, el envío (incluso por medios electrónicos), de comunicaciones comerciales y publicitarias, por parte de PUBLICACIONES DYNA SL, se compromete a mantener actualizados los mismos. y podrá ejercitar los derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición, dirigiéndose a PUBLICACIONES DYNA SL, C/Alameda de Mazarredo, 69, 48009 Bilbao.

❑ *No autorizo el envío por medios electrónicos de información comercial, por parte de PUBLICACIONES DYNA SL.*
❑ *No deseo que mis datos sean empleados con finalidades publicitarias por parte de PUBLICACIONES DYNA SL.*

contenido

Marzo - Abril 2020

artículos de investigación

163
INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DEMANDA DE ELECTRICIDAD. EL CASO DEL PAÍS VASCO
THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON ELECTRICITY DEMAND. CASE STUDY IN THE BASQUE COUNTRY

170
PROCESADO AUTOMÁTICO DE IMAGEN APLICADO AL CONTEO Y CARACTERIZACIÓN DE LA FORMA DE CÉLULAS ENDOTELIALES CORNEALES
AUTOMATIC IMAGE PROCESSING APPLIED TO CORNEAL ENDOTHELIUM CELL COUNT AND SHAPE CHARACTERIZATION

175
CONTROL DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO AL RUIDO AÉREO ENTRE PARTICIONES INTERIORES EN OBRA TERMINADA SEGÚN LA NORMATIVA CTE-DB-HR
CONTROL OF AIRBORNE SOUND INSULATION BETWEEN INTERIOR PARTITIONS OF THE FINISHED CONSTRUCTION ACCORDING TO THE STANDARD CTE-DB-HR

181
MODELO DE ENSAMBLE DE MÚLTIPLES REDES NEURONALES ARTIFICIALES PARA EL MONITOREO ESTADÍSTICO DE PATRONES EN PROCESOS BIVARIANTES
AN ENSEMBLE MODEL FOR STATISTICAL MONITORING OF PATTERNS IN BIVARIATE PROCESSES BASED ON MULTIPLE ARTIFICIAL NEURONAL NETWORKS

187
EFICACIA DE ANCLAJES PARA REFUERZOS ESTRUCTURALES CON MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA Y CEMENTOSA
EFECTIVENESS OF ANCHORS FOR STRUCTURAL RETROFITTING WITH COMPOSITE MATERIALS OF POLYMERIC AND CEMENTITIOUS MATRICES

192
ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA NUEVA PRÓTESIS CON ESTRUCTURA INTERNA PARA REEMPLAZO DE TOBILLO
STRUCTURAL ANALYSIS OF A NEW TOTAL ANKLE REPLACEMENT PROSTHESIS WITH INTERNAL STRUCTURE

198
FLY ASH FOUNDATION REINFORCED BY CEMENT–SOIL MIXING PILES
CIMENTACIÓN DE CENIZAS VOLANTES REFORZADAS CON PILOTES DE MEZCLA CEMENTO-TIERRA

205
MODELO ANALÍTICO PARA LA PREDICCIÓN DE LA DISTORSIÓN EN COMPONENTES MECANIZADOS
ANALITICAL MODEL FOR DISTORTION PREDICTION IN MACHINED COMPONENTS

211
TEXTURIZADO POR RECTIFICADO PARA LA MEJORA DE PROPIEDADES DE FRICCIÓN EN COMPONENTES INDUSTRIALES
TEXTURING BY GRINDING FOR THE IMPROVEMENT OF FRICTION PROPERTIES IN INDUSTRIAL COMPONENTS

218
GENETIC ALGORITHM OPTIMAL ARRANGEMENT OF POSITIVE AND NEGATIVE STIFFNESS DAMPERS FOR HYBRID DAMPING BASED ON SEISMIC WAVES METHOD
DISPOSICIÓN ÓPTIMA DE UN ALGORITMO GENÉTICO DE AMORTIGUADORES DE RIGIDEZ POSITIVA Y NEGATIVA PARA LA AMORTIGUACIÓN HÍBRIDA BASADA EN EL MÉTODO DE ONDAS SÍSMICAS

nuestras cosas

116 Dyna hace 80 años

117 Editorial

118 Arqueología Industrial

perspectivas

119 ¿Por qué las técnicas de aprendizaje profundo superan a las técnicas de aprendizaje automático tradicionales?

123 El futuro del hierro fundido en la industria de automoción

notas técnicas

124 Equipos inteligentes y conectados para optimizar su ciclo de vida

125 Mecanizado de superficies regladas desarrollables mediante algoritmos matemáticos

126 Propuesta metodológica de adaptación del Value Stream Mapping a modelos de simulación en entornos navales

127 Mercado online de proveedores y bienes de equipo

128 Realidad frente a expectativas en la impresión 3D actual

129 Energía renovable de briquetas de biomasa y aglutinantes orgánicos

colaboraciones

130 Estudio de los masteres en Ingeniería Industrial en las Universidades españolas

134 Análisis por elementos finitos del comportamiento estructural de fortificaciones españolas en los Estados Unidos aplicando la norma ASCE 7-10 y simulación de impactos y explosiones

139 La sostenibilidad energética: indicadores macroeconómicos y sectores productivos

144 Nuevo proceso de fabricación de rigidizadores estructurales aeronáuticos a partir de rigidizadores rectos usando un molde adaptativo

149 Mejora del dimensionamiento de una red de calidad del aire mediante el empleo de métodos estadísticos multivariantes

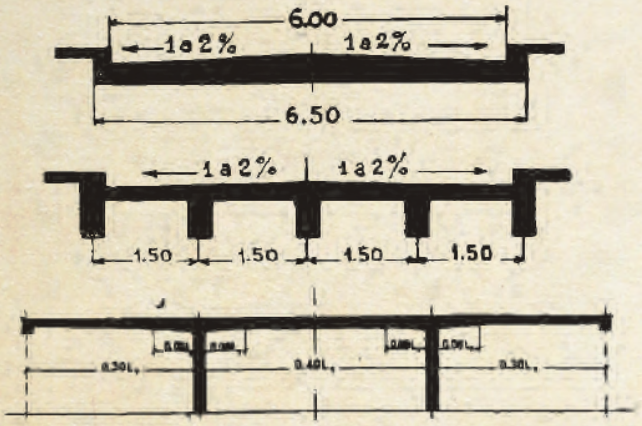
154 Enfoque práctico en la enseñanza del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) en un curso de termodinámica aplicada

158 Evaluación de la utilización de escorias siderúrgicas bof para la preparación superficial de materiales por abrasión

Hace 80 años

COLECCIÓN DE PUENTES DE ALTURA ESTRICTA

"La Colección de Puentes de Altura Estricta se proyectó para solucionar un problema concreto que se plantea con extraordinaria frecuencia: salvar con la mínima pérdida de altura los cauces corrientes". Para ello, se elige el tramo recto, adaptando cada uno de ellos a la forma de igual resistencia a la flexión, consiguiendo una gran reducción de la altura y por consiguiente del peso propio, llegando la economía a un 20 % en hormigón y un 30 % en hierro.



Se dan en el artículo, ejemplos de cálculos para numerosos puentes así realizados y que llegan a luces de 70 m, adaptándose mucho mejor que los de arcos a las condiciones de rasante y desagüe, aunque los modelos de la Colección no llegan nada más que a 20 m.

"La Colección de Puentes de Altura Estricta está a punto de ser declarada «Colección oficial» por acuerdo del Ministerio de Obras Públicas"

Carlos Fernández Casado, Ingeniero de Caminos

DESARROLLO Y RESULTADO DE LOS AUTOMOTORES FERROVIARIOS

"Con independencia del creciente perfeccionamiento de la locomotora de vapor y de la electrificación", el autor opina que la utilización de lo que llama *"automóviles ferroviarios con motor independiente"*, supone una importante ventaja cuando las distancias o el número de pasajeros no justifica los convoyes con locomotoras de vapor.

Después de realizar un estudio de las ventajas de este tipo de vehículos ferroviarios, da un repaso a la situación de su desarrollo en diferentes países citando especialmente a Francia, Alemania (por la necesidad de comunicación con las regiones anexionadas), Holanda, Bélgica, Inglaterra (la menos decidida), etc.

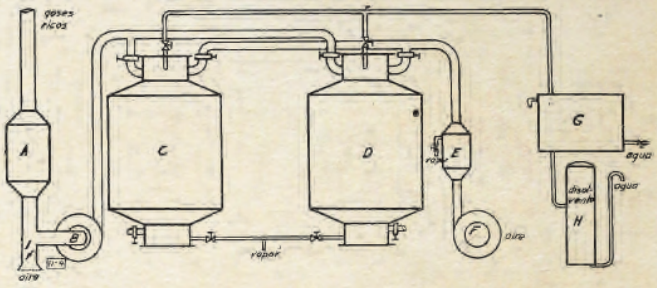
Proclama que España, que ya inició estudios y pruebas a partir de 1932, debe recuperar los disponibles ahora en malas condiciones tras la guerra y dotarse del parque necesario. Asegura que, aunque en general se aplican con velocidades comerciales de 60 km/h, los hay en líneas que llegan a los 125 km/h.

Agustín Mª Aleixandre, Ingeniero Industrial

LA RECUPERACIÓN DE VAPORES DE LÍQUIDOS VOLÁTILES

Este documentado estudio se inicia exponiendo *"la importancia de la recuperación de vapores de líquidos volátiles producidos o empleados en las manipulaciones industriales"*, además de por la depuración de la atmósfera de los locales, por la mejora de las condiciones económicas de la explotación.

Se listan trece substancias volátiles de mayor utilización en la industria y se abordan los casos y procedimientos de recuperación, dedicando especial atención al reciente medio del filtrado por carbón activo, del que se desarrolla su presentación y método de fabricación. El esquema para una instalación de ese tipo se explica detalladamente.



El artículo concluye citando las principales actividades industriales donde es posible implantar la recuperación y sus ventajas económicas.

Luis Salís, Ingeniero Industrial

LA NACIONALIZACIÓN DE LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES

La aparición de una Orden Ministerial relativa a la unificación de Estadísticas de Trabajo y otra sobre Normas de Seguridad e Higiene en los Talleres, promueve la aparición de estos artículos sobre un tema tan importante como el de los accidentes del trabajo, señalando *"la conveniencia, o mejor, la necesidad, de una campaña preventiva general, análoga a la que con tan maravillosos resultados se viene realizando desde hace años en los Estados Unidos bajo el lema «Safety First»".*

Se destaca que, en contraste con otros países, no hay en España una *"sola entidad, que sea esta, si no su única misión, sí al menos la primordial".* De ahí la necesidad de crear un organismo del Estado que aborde la campaña preventiva con carácter nacional y práctico, de forma que se pueda disponer de una *"fabricación nacional de medios protectores, bien de uso individual, bien para ser instalados en las máquinas"*, que en estos momentos no existe.

J. Pagola, Ingeniero Industrial

OTRAS NOTICIAS

Decisión tomada en la reunión reglamentaria de la Junta Federal de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, celebrada en Madrid los días 10 y 11 de marzo de 1940.

"Revista técnica de la Federación —Se acordó que la Revista DYNA, editada por la Asociación de Ingenieros Industriales de Bilbao, siga ostentando la calidad de Revista de los Ingenieros Industriales de España"

El equipo editor de DYNA agradeció este acuerdo y prometió el máximo *"esfuerzo para que esta Revista responda en todo momento a la alta y honrosa representación que ostenta".* Solo la escasez de primera materia impedía que las tiradas permitiesen servir el número de ejemplares deseado por las Asociaciones.

CÓMO NOS VEN Y CÓMO DESEAMOS QUE NOS VEAN

En este mundo mediático, donde la comunicación vale tanto o más que los hechos, es cada vez más necesario hacerse la pregunta sobre cómo somos vistos los ingenieros industriales por la sociedad y, sobre todo, si se nos reconoce como un colectivo inconfundible entre los muchos que se presentan ante la opinión pública.

Es prácticamente seguro que, si realizásemos una encuesta a pie de calle acerca de la percepción que se tiene de los cometidos, por ejemplo, de abogados, médicos, arquitectos, ingenieros de caminos o informáticos, las respuestas, aunque variopintas y a veces confusas, mostrarían que se les tiene relativamente identificados como colectivos con funciones específicas y, sobre todo, necesarias para la sociedad. ¿Podemos pensar que eso sucedería igualmente si se plantease sobre los ingenieros industriales o, por el contrario, se encontrarían dificultades para expresarlas?

A esta confusión ha contribuido en gran manera el rediseño de titulaciones a partir de los conceptos planteados tras el llamado proceso de Bolonia: a la compleja red de grados ha sucedido otra no menor maraña de másteres a la que puede accederse por caminos diversos. Diferentes grados y muchos de esos másteres tienen en sus denominaciones la voz "ingeniero", con lo que la confusión está servida. ¿Cómo distinguir entre todo ese bosque, el título habilitante de Ingeniería Industrial?

La Universidad ha dejado de ser, frente al común de la sociedad, luz orientadora en cuanto al contenido y alcance de sus propias enseñanzas, lo que debe ser indagado por los propios interesados, a veces con escaso acierto. Las Administraciones Públicas, tan mal o peor informadas, no saben o no quieren saber, las condiciones legales que deben cumplir para cubrir puestos que antes estaban perfectamente claros. Las familias y los educadores de las enseñanzas medias pueden tener dificultades para explicar, orientar y animar a chicos y chicas hacia las carreras técnicas, incluido su significado y posibilidades reales.

Posiblemente este problema de falta de sistemática para presentar y explicar nuestro papel en el desarrollo del país, es la raíz de la amplia ignorancia que se tiene en cuanto a que se vea claro quiénes somos, cuáles son nuestras funciones y cómo nuestra participación ha influido en muchos de los avances conseguidos, tanto económicos como sociales. ¿Quién debe ser el que alce la voz y ponga un poco de orden en la presentación de nuestro colectivo?

La respuesta está a nuestro alcance: disponemos de unas Asociaciones y unos Colegios que poseen facultades y medios para llegar a la opinión pública, conocer exactamente cómo nos ven y, en caso de necesidad, emplear toda nuestra energía en conseguir cómo deseamos que nos vean. Quizá lo importante sea dejar de mirarnos al ombligo y volcarnos en esa tarea que, indirectamente, puede que atraiga a más jóvenes a nuestras organizaciones.

El futuro próximo presenta importantes retos para la Ingeniería Industrial: el impulso a una necesaria Política Industrial sólida, tantas veces aplazada o difusa, las acciones ante el cambio climático y la transición energética, la digitalización de la sociedad, la globalización de la industria...

Nuestros titulados, con su formación básica sólida y su contenido multidisciplinar, son capaces de afrontar con éxito, en cualquier escenario, cometidos que ahora, con frecuencia, están en manos de técnicos menos preparados aunque más hábiles a la hora de presentar sus opiniones y sus proyectos.

Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España
Comisión de Patrimonio Industrial

2018 AÑO EUROPEO DEL PATRIMONIO CULTURAL #EuropeForCulture

FERRERÍA DE SAN BLAS
MUSEO DE LA SIDERURGIA Y DE LA MINERÍA DE SABERO

En la década de 1830 se llevó a cabo en el valle de Sabero la actividad minera. Además de carbón tuvo lugar la explotación de minas de minerales de hierro, abundante en estas cuencas en diferentes estados.
Un grupo de hombres creyeron que era posible traer a España los adelantos técnicos e las infraestructuras que estaban desarrollándose en países como Bélgica y Francia, e hicieron posible la instauración en estas tierras de la primera industria siderúrgica de España, en 1846, construyéndose un complejo industrial siderúrgico con altos hornos de cok, algo que supuso un acontecimiento de gran importancia en aquella época por la utilización de las más alta tecnología posible.
El complejo panorama político y social de España en esos momentos, la falta de demanda interna y de capital español, junto con la falta de infraestructuras ferroviarias que encareció los costes de producción, forzaron el cierre en 1866, hasta 1971, un año antes de la puesta en marcha de Compostilla.





La nave de laminación y forja, realizada en 1846, totalmente diáfana, sustentada la cubierta por una sucesión de arcos diafragma, de gran interés constructivo, es el único vestigio que queda en España de una instalación industrial de la época.
Albergó las primeras máquinas de vapor de la provincia, así como las grandes maquinas importadas de Gran Bretaña que estaban revolucionando la siderurgia en Europa: trenes de cilindro y laminación, martillo pilón y cizalla.



Se ha recreado parte del Taller de Ajuste de la Ferrería, que se encontraba en el edificio anexo donde se realizaban operaciones de construcción y reparación de los componentes necesarios para el correcto funcionamiento, tanto en lo referente a la fabricación como a la reparación de toda clase de elementos de las máquinas.
Disponía de torno (para desbastar y tornear los cilindros de los trenes de laminación), de un cepillo (para acepillar y pulimentar todo tipo de llantas de hierro y bronce), y de un taladro (para la realización de agujeros de diferentes medidas en chapas y elementos).
Estas máquinas fueron adquiridas a partir de 1850 a la inglesa James Nasmyth & Company de Manchester, empresa que era la mayor proveedora de este tipo de maquinaria en las ferrerías de la zona siderúrgica francesa. Acogía la moldería y la carpintería, donde se construían los modelos que servían para el moldeo de la arena de las piezas y elementos de fundición.

En 1847 comenzó a fabricarse hierro en un alto horno de cok, y en 1860 se inauguraba el segundo para ya, de una forma intermitente, mantener su producción hasta el cierre definitivo.
La paralización de los hornos supuso el abandono de las minas de hierro y de carbón. Estas últimas volverían después a ser explotadas.



En otros bloques temáticos se recorre el proceso histórico del valle y de sus gentes, y aspectos básicos del trabajo del minero que son objetos de explicación mediante audiovisuales y una completa colección de herramientas, que muestran cómo han evolucionado estas tareas.



Destacaba la ubicación de la farmacia dentro del complejo que supuso un avance importante del concepto de atención social a la clase obrera, ya que las nuevas formas de producción comportaban frecuentes accidentes y lesiones.
Los servicios de la farmacia se han mantenido ininterrumpidamente hasta nuestros días. A partir de 1930 la actividad de atención pública se amplió con la inauguración del Hospital Izaguirre.

ASOCIACIÓN DE INGENIEROS SUPERIORES INDUSTRIALES DE LEÓN





PATRIMONIO INDUSTRIAL en España

¿Por qué las técnicas de aprendizaje profundo superan a las técnicas de aprendizaje automático tradicionales?

Why deep learning performs better than classical machine learning?

Artzai Picon[1, 2], Aitor Alvarez-Gila[1], Unai Irusta[2], Jone Echazarra[1]

[1] TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA). (España)

[2] Universidad del País Vasco (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9574

En los últimos años, las técnicas de aprendizaje profundo (*deep learning*) han superado a los métodos clásicos basados en aprendizaje máquina (*machine learning*) tradicional a la hora de realizar tareas complejas de reconocimiento de patrones. En este artículo trataremos de explicar las razones.

Aprendizaje máquina frente a aprendizaje profundo

El paradigma tradicional de aprendizaje máquina o aprendizaje automático se basa en la extracción y selección de aquellas características de una imagen o señal de entrada que resulten relevantes para resolver la tarea encomendada (por ejemplo, su clasificación en una de las categorías predefinidas) para después aplicar un modelo de inteligencia artificial sobre las características extraídas. Las operaciones matemáticas que realizan esta extracción de características (*descriptores*) son normalmente diseñadas de forma manual por expertos con un buen conocimiento del dominio de aplicación. Los sistemas de visión artificial basados en aprendizaje máquina tradicional utilizaban descriptores visuales cuya función era transformar cada imagen de entrada en una representación compacta de la misma, siendo ésta descriptiva de la forma, textura o color (entre otros aspectos) de los diferentes elementos presentes en la imagen. Los bancos de filtros de Gabor o los Local Binary Patterns (LBP), por ejemplo, eran de uso común para extraer características de textura de la imagen; asimismo, características extraídas de un histograma de la imagen sobre modelos de color transformados se utilizaban para describir el color de la misma.

En nuestro trabajo inicial para la identificación de enfermedades en plantas en ambientes reales a partir de imágenes [1], extraíamos características de textura (LBP) y de color (media y varianza del modelo de color *Lab*) de *blobs* y regiones de la imagen sospechosas de presentar una enfermedad. Este algoritmo requería definir manualmente descriptores visuales que permitieran transformar la alta dimensionalidad de la imagen en un conjunto reducido de números que describieran cada región de la imagen que fuera susceptible de presentar enfermedad.

Tal y como imaginará el lector, añadir nuevas enfermedades sin que la precisión se resintiera comenzó a ser gradualmente más complicado y, de forma adicional, la capacidad de discriminación de los descriptores manualmente diseñados no era suficiente para discernir con éxito enfermedades más complicadas o sutiles. Esto se debe a que, al tratar de optimizar dicha propiedad para un descriptor, se tiende a sacrificar la robustez del mismo frente a variaciones en aquellos aspectos de la apariencia de la imagen que resultan irrelevantes o un obstáculo para realizar la clasificación con éxito (tales como la iluminación, fondos complejos, deformaciones de los objetos a identificar, etc.). Tras la inclusión de múltiples módulos para abordar algunos de esos retos, dicho algoritmo lograba una precisión de 80% (*Balanced Accuracy*) para un conjunto de tres enfermedades, a costa de una gran complejidad del proceso resultante. Sin embargo, tras su migración a un diseño de algoritmo basado en aprendizaje profundo [2] el diagrama de diseño del algoritmo se simplificó de forma muy significativa, y la precisión del mismo se incrementó hasta el 91%. En estos momentos alcanzamos una precisión del 99% gracias a otra de las ventajas inherentes al esquema de aprendizaje profundo: su carácter de marco de trabajo común y flexible que permite integrar y fusionar múltiples entradas de diferente tipo, tales como la información relativa a la especie de planta analizada, así como realizar varias predicciones de salida simultáneas [3].

Pero volvamos a la cuestión principal de este artículo: por qué las características extraídas mediante la aplicación de descriptores diseñados manualmente con el conocimiento del dominio, conjuntamente con potentes algoritmos de aprendizaje máquina como XGBoost [4], Support Vector Machines o Random Forests [5], no pueden competir con la capacidad de las técnicas de *deep learning* para aprender características con gran capacidad discriminativa? La respuesta la encontramos directamente en la descripción de aprendizaje profundo. De acuerdo con la definición dada en [6] por

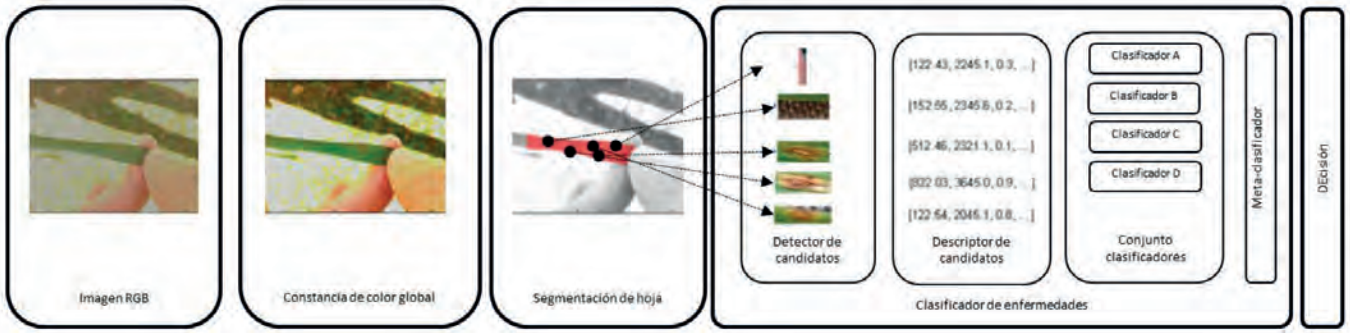


Figura 1: Algoritmo de visión artificial clásico basado en características diseñadas manualmente sobre las que se aplica un algoritmo de aprendizaje máquina

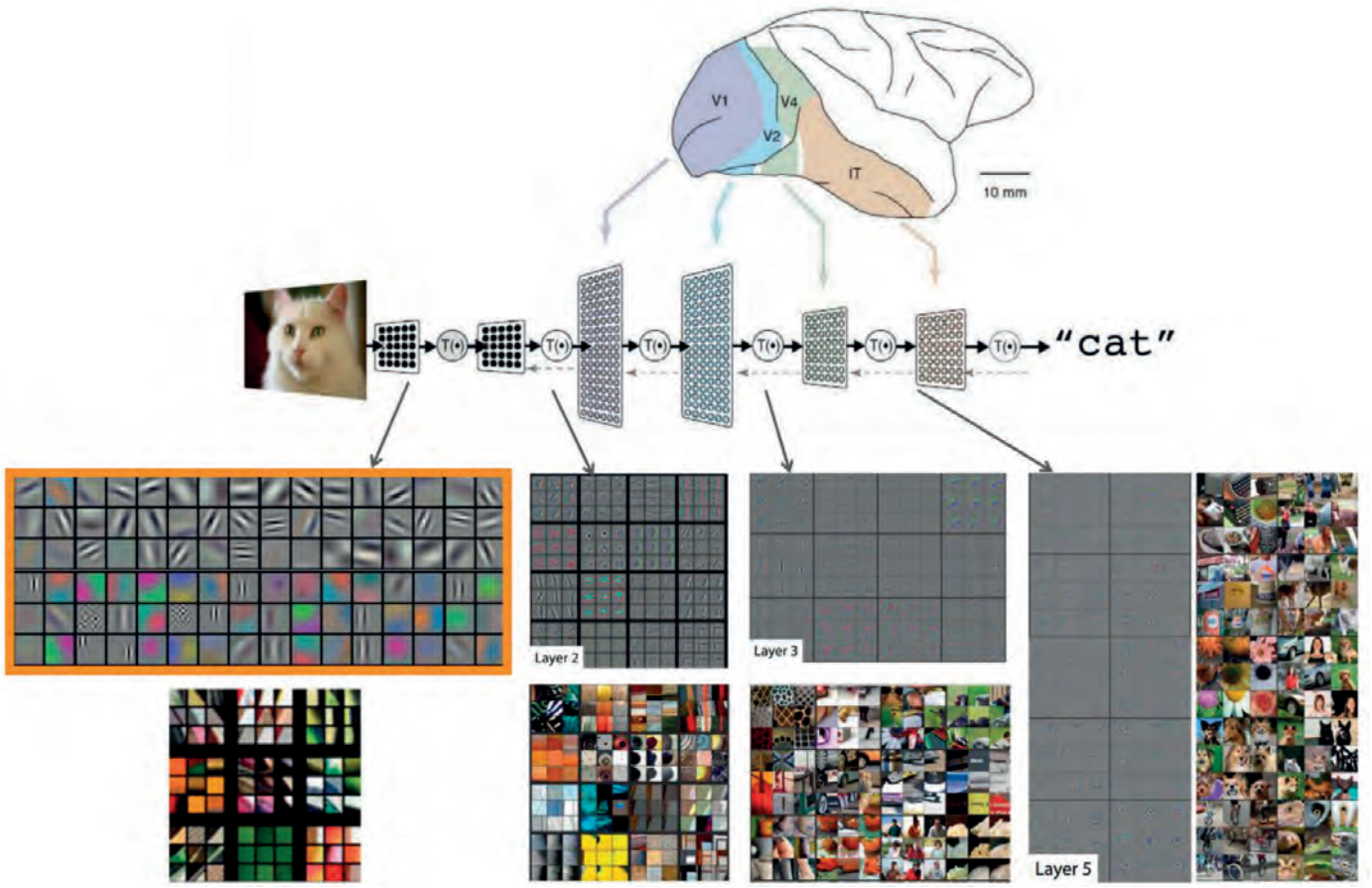


Figura 2: Filtros extraídos por una red convolucional (CNN-Convolutional Neural Network) cuando es entrenada sobre ImageNet. Se puede observar que las primeras capas aprenden filtros asociados a conceptos de bajo nivel como oponencias de color o detección de bordes, mientras que los filtros de más alto nivel se corresponden con conceptos más abstractos asociados a la tarea. Imágenes: [8], [9]

el reciente premio Turing Yoshua Bengio, "*Los métodos de aprendizaje profundo tratan de aprender jerarquías de características en las que las características de los niveles altos de la jerarquía se forman por composición de las características extraídas a niveles inferiores. El aprendizaje automático de características a múltiples niveles de abstracción permite a un sistema aprender funciones complejas que mapean la entrada con la salida esperada directamente a partir del dato en bruto sin depender del diseño manual de características por parte de un experto*". Así pues, los métodos basados en aprendizaje profundo son capaces de aprender a extraer las características más relevantes para la tarea objetivo, y resolver así el problema de forma óptima. Se trata, por tanto, de extractores de características jerárquicas óptimas, lo cual resulta especialmente relevante en el caso de las características de las capas más altas de la jerarquía (i.e. las de mayor nivel de abstracción), dado que los humanos no conocemos una buena forma de diseñarlas.

El repositorio de imágenes naturales Imagenet [7] se compone de más de un millón de imágenes pertenecientes a 1000 clases diferentes. La tarea de *clasificación de imágenes* consiste en identificar, para una imagen de entrada dada, a cuál de esas categorías pertenece dicha imagen. En la Figura 2 se muestran los distintos filtros (extractores de características) aprendidos por una red neuronal profunda (DNN-Deep Neural Network) en sus diferentes capas durante su entrenamiento para resolver esta tarea, sobre la base de datos Imagenet. Cabe destacar que los filtros extraídos en la parte más baja de la jerarquía funcionan bien como detectores de oposiciones de color o como extractores de bordes de diverso tipo, y se asemejan, por un lado, a la codificación de la información cromática en canales oponentes de color y, por otro, a la funcionalidad de detección de bordes en diferentes orientaciones y frecuencias propias de las capas más bajas del córtex visual humano. Además, estos filtros nos recuerdan a los bancos de filtros de Gabor para detección de texturas y al espacio de color *CIE L*a*b** que se han venido usando de forma habitual para el diseño manual de extractores de características visuales para alimentar modelos clásicos de aprendizaje máquina.

La capacidad de las capas convolucionales que se apilan en una DNN para extraer filtros que puedan describir de forma jerárquica una señal de entrada para cumplir con una determinada tarea puede ser aplicado a otros tipos de datos diferentes a la imagen. Recientemente hemos publicado un trabajo [10] donde analizamos los beneficios de aplicar técnicas de aprendizaje profundo en vez de las clásicas de aprendizaje máquina para analizar la señal de electrocardiograma (ECG) de pacientes en parada cardiorrespiratoria extrahospitalaria (PCREH) para identificar si es necesario desfibrilar usando un Desfibrilador Externo Automático (DEA).

Algoritmo para identificación de arritmias ventriculares letales

La PCREH es una de las principales causas de muerte en el mundo, con una incidencia anual media de 55 casos por cada 100.000 habitantes. Las arritmias ventriculares letales producen la parada cardiorrespiratoria, y la única terapia efectiva para revertirlas es la desfibrilación por descarga eléctrica. Los DEA son dispositivos sencillos diseñados para que personal sin entrenamiento previo pueda usarlos, e incorporan un algoritmo de decisión que determina si el sistema debe desfibrilar o no a partir del análisis de la señal ECG del paciente.

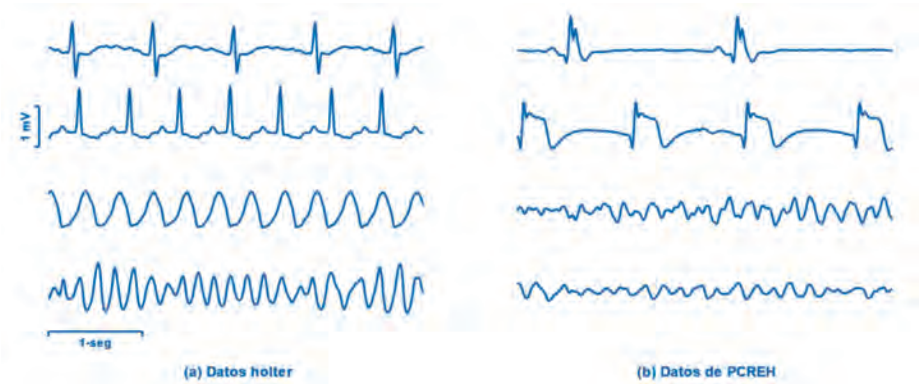


Figure 3: Ejemplos de ritmos ECG desfibrilables y no desfibrilables de un Holter (izquierda) y de pacientes en PCREH (derecha)

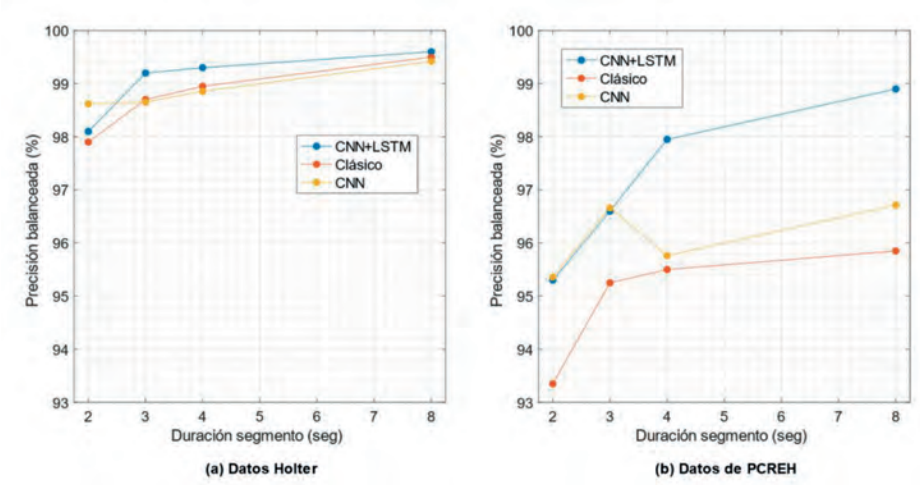


Figura 4: Resultados comparativos de precisión de algoritmos de aprendizaje máquina tradicional, red neuronal convolucional y red neuronal convolucional + capas recurrentes

Cuando el algoritmo detecta un ritmo desfibrilable el DEA proporciona una descarga eléctrica con el fin de restaurar el ritmo cardiaco normal. En caso contrario, el desfibrilador automático recomienda continuar con la reanimación cardiopulmonar (RCP). La American Heart Association (AHA) ha determinado una precisión mínima para los algoritmos de detección de ritmos desfibrilables, de forma que se garantice un uso seguro del dispositivo y que se aplique al paciente la terapia adecuada. Los ritmos no desfibrilables deben detectarse con especificidad (clase negativa) superior al 95%, para evitar descargas innecesarias, y los ritmos desfibrilables con una sensibilidad (clase positiva) superior al 90%.

En nuestro estudio, replicábamos un estudio anterior que analizaba la mejor combinación de características y descriptores de la señal de ECG que han sido diseñados durante las últimas décadas con el fin de identificar ritmos desfibrilables. Estos descriptores fueron diseñados manualmente para detectar rasgos distintivos de las arritmias ventriculares letales en la señal ECG, tales como irregularidad en la forma de onda, ausencia, estrechamiento o ampliación de los complejos QRS (las deflexiones en la forma de onda del ECG asociadas a la contracción ventricular), anchos de banda más pequeños o ritmos ventriculares elevados, entre otros.

Decidimos que, en vez de utilizar las características clásicas preexistentes, diseñaríamos una DNN compuesta, por un lado, por capas convolucionales que permitieran aprender aquellos filtros que eran óptimos para describir nuestra señal y, por otro, por capas recurrentes que permitieran el modelado de las dependencias temporales de la señal. Además, desarrollamos y probamos tanto métodos basados en deep learning como en aprendizaje máquina tradicional, para clasificar ECG grabados mediante Holter nada más producirse la parada, pero también para clasificar datos de PCREH grabados varios minutos después de producirse la parada (ver Figura 3).

La primera conclusión interesante fue que el método basado en aprendizaje profundo mejoraba la precisión de los métodos basados en aprendizaje máquina tradicional (ver Figura 4). Además, requería intervalos de señal más cortos para obtener dicha precisión. Esto se cumplía tanto para las muestras tomadas ya en el hospital como, de forma mucho más notable ya que la mejora de precisión era mucho mayor, para los casos de PCREH que constituyen el escenario más difícil para la clasificación.

Pero el beneficio del método basado en *deep learning* se reveló de forma más notoria cuando proyectamos las características diseñadas manualmente (seleccionadas como las mejores características para un abordaje del problema desde el aprendizaje máquina clásico) sobre un mapa bidimensional [11] e hicimos lo propio con las características de más alto nivel (*embedding*) aprendidas por la red DNN (Figura 5). Pudimos observar que las características extraídas por la DNN presentan una evidente mejora de la separabilidad con respecto de las diseñadas manualmente, facilitando así la labor de un clasificador simple actuando sobre éstas.

CONCLUSIÓN

El poder descriptivo de las arquitecturas de aprendizaje profundo para describir jerárquicamente datos y señales complejas en niveles elevados de abstracción las habilita para extraer características optimizadas para realizar la tarea encomendada de forma automática.

Estos algoritmos son capaces de extraer aquellas características que mejor resuelven la tarea sin intervención humana, lo que puede resultar de importancia crítica. Por ejemplo en mayo de 2019, científicos del MIT publicaron un artículo [12] sobre detección de cáncer de mama, donde utilizaron imágenes que habían sido analizadas por radiólogos. Sin embargo, para entrenar la red neuronal no utilizaron como anotación el diagnóstico de los radiólogos, sino el estado de salud del paciente cinco años después. Los modelos generados extrajeron patrones y una descripción de alto nivel de la imagen que permite diagnosticar el riesgo de cáncer cinco años antes de que el diagnóstico pudiera ser realizado. Esto habría resultado imposible mediante el uso de descriptores de características prediseñados por humanos expertos que están basados en conocimiento existente. En un escenario totalmente diferente, los sistemas basados en aprendizaje por refuerzo (basado en aprendizaje profundo) que superan a jugadores humanos en el ajedrez, go o Starcraft aprenden estrategias totalmente desconocidas e inesperadas para los humanos.

Las técnicas de aprendizaje profundo

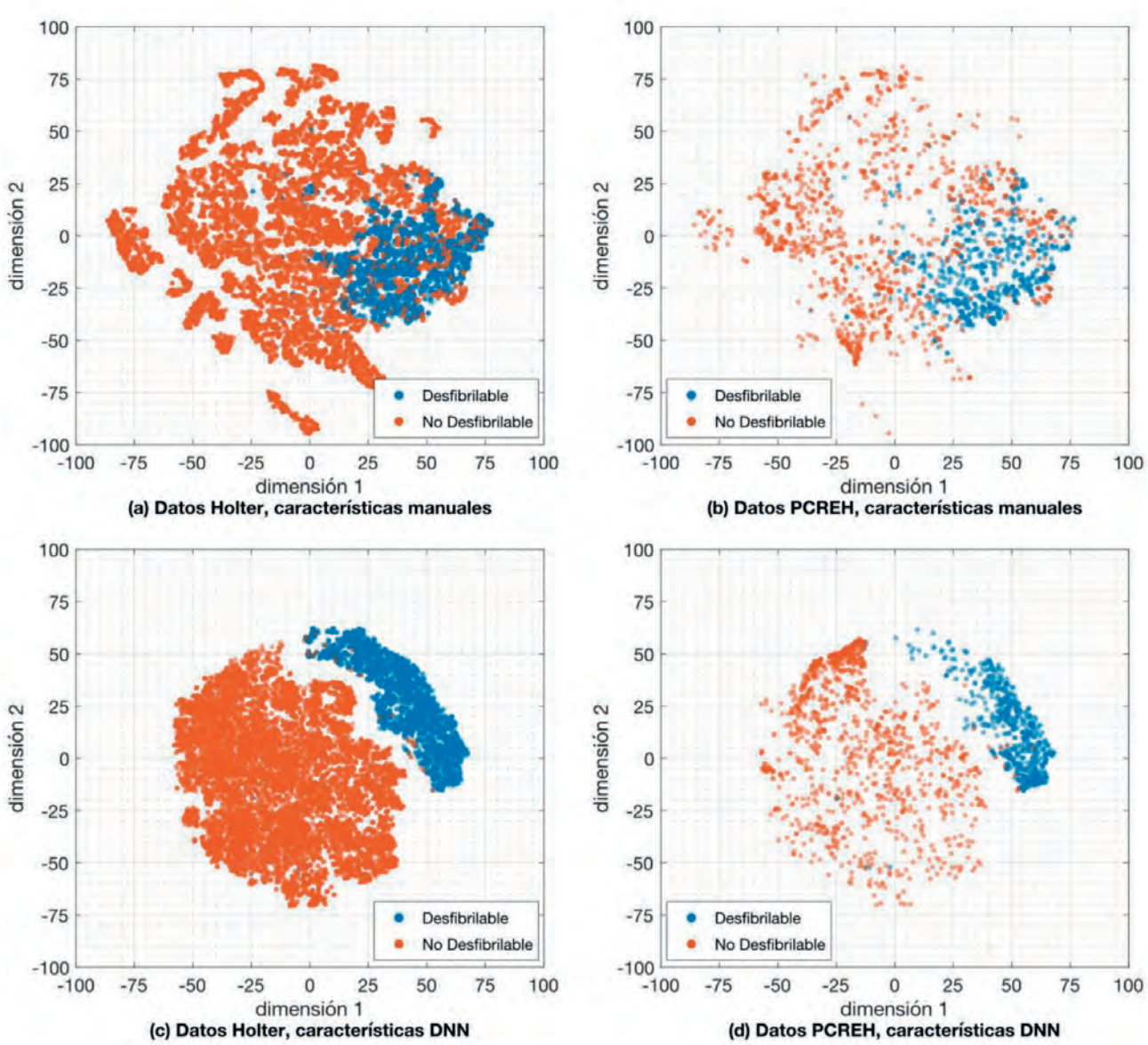


Figure 5: Análisis de la separabilidad de las características extraídas manualmente y de las extraídas por nuestra red neuronal [10]

permiten extraer de forma automática la mejor representación interna de los datos para la tarea objetivo, permitiendo incluso aflorar información actualmente desconocida o ignorada por el ser humano con gran flexibilidad y eficacia. Todo ello da lugar a un marco de trabajo enormemente versátil y aplicable de forma masiva y transversal en dominios más allá de la imagen agro o señales médicas, tales como la industria productiva y el control de calidad.

REFERENCIAS

[1] A. Johannes, A. Picon, A. Alvarez-Gila, J. Echazarra, S. Rodriguez-Vaamonde, A. D. Navajas, and A. Ortiz-Barredo, "Automatic plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case," Comput. Electron. Agric., vol. 138, pp. 200–209, Jun. 2017.

[2] A. Picon, A. Alvarez-Gila, M. Seitz, A. Ortiz-Barredo, J. Echazarra, and A. Johannes, "Deep convolutional neural networks for mobile capture device-based crop disease classification in the wild," Comput. Electron. Agric., vol. 161, pp. 280–290, Jun. 2019.

[3] A. Picon, A. O. Barredo, A. Alvarez-Gila, J. Echazarra, M. Seitz, and P. Mohnke, "Crop conditional Convolutional Neural Networks for massive multi-crop plant disease classification over cell phone acquired images taken on real field condition," Comput. Electron. Agric., Nov. 2019.

[4] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System," in Proceedings of the 22Nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, New York, NY, USA, 2016, pp. 785–794.

[5] L. Breiman, "Random Forests," Mach. Learn., vol. 45, no. 1, pp. 5–32, Oct. 2001.

[6] Y. Bengio, "Learning Deep Architectures for AI," Found Trends Mach Learn, vol. 2, no. 1, pp. 1–127, Jan. 2009.

[7] O. Russakovsky, J. Deng, H. Su, J. Krause, S. Satheesh, S. Ma, Z. Huang, A. Karpathy, A. Khosla, M. Bernstein, A. C. Berg, and L. Fei-Fei, "ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge," Int. J. Comput. Vis. IJCV, vol. 115, no. 3, pp. 211–252, 2015.

[8] M. D. Zeiler and R. Fergus, "Visualizing and Understanding Convolutional Networks," in Computer Vision – ECCV 2014, D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, and T. Tuytelaars, Eds. Springer International Publishing, 2014, pp. 818–833.

[9] L. Masuch, "Deep learning. A visual introduction," 06-Dec-2015.

[10] A. Picon, Unai Irusta, A. Alvarez-Gila, E. Aramendi, F. Alonso-Atienza, C. Figuera, U. Ayala, E. Garrote, L. Wik, J. Kramer-Johansen, and T. Estestol, "Mixed Convolutional and Long Short-Term Memory Network for the Detection of Lethal Ventricular Arrhythmia," PLOS ONE 2019;14(5):e0216756.

[11] L. V. der Maaten and G. Hinton, "Visualizing data using t-SNE," J. Mach. Learn. Res., vol. 9, no. 2579–2605, p. 85, 2008.

[12] A. Yala, C. Lehman, T. Schuster, T. Portnoi, and R. Barzilay, "A Deep Learning Mammography-based Model for Improved Breast Cancer Risk Prediction," Radiology, vol. 292, no. 1, pp. 60–66, May 2019.

El futuro del hierro fundido en la industria de automoción

Future of cast iron in car industry

Impulsado por el Centro de Investigaciones Metalúrgicas AZTERLAN se celebró en Bilbao el 2nd Carl Loper Cast Iron Symposium los días 30 de septiembre y 1 de octubre de 2019. Ofrecemos una reseña de la presentación que, en el mismo hicieron, con este título, los especialistas del Grupo RENAULT, M. Albertalli y L. Vaissière, sobre la repercusión que la evolución tecnológica del automóvil puede representar para la industria de la fundición.

Ignacio Fernandez de Aguirre
(Asociación de Bizkaia)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9520

Desde los comienzos de la industria de automoción, la fundición grafítica ha sido el material básico para la elaboración de gran parte de sus elementos mecánicos por colada de piezas en moldes de arena con formas próximas a su uso final. A las iniciales estructuras de grafito laminar se han ido incorporando posteriores avances, tanto en las formas grafíticas, esferoidales o vermiculares, como en la matriz, utilizando elementos de aleación y/o tratamientos térmicos. Progresivamente, otros materiales, como las aleaciones de aluminio, han ido sustituyendo algunos de los componentes de hierro fundido, buscando reducciones de peso y menor consumo de combustible. Pero es ahora cuando las exigencias, sobre todo medioambientales, fuerzan al máximo esa reducción. Como amenaza definitiva, el camino hacia el coche eléctrico (*full EV*), sin motores de combustión, puede significar la desaparición de muchos componentes fundidos asociados a ese tipo de propulsión.

A partir de los primeros años del siglo XXI, las emisiones de CO_2 producidas por un automóvil en marcha se han reducido de forma notable, impulsadas por diferentes normativas generales o locales y se espera que para 2025, o quizá antes, se encuentre en todos los países por debajo de los 100 g CO_2/km. Llegar a estos niveles ha sido posible por los avances tecnológicos propios del sistema de combustión, por la mejora del filtrado en el escape y por la reducción de peso que origina un menor consumo de combustible.

Por ejemplo, en las piezas que integran el motor y caja de cambios, se ha pasado de los 87 kg de ayer a 72,5 kg hoy en los sistemas diésel y a 22 kg en gasolina, a base de utilizar materiales distintos al hierro fundido. Pero en un futuro más lejano, cuando se prohíban radicalmente los motores de combustión, solamente serán necesarios 4,5 kg. Algo similar sucede con las piezas del chasis: los 85 kg de ayer son hoy solamente 66 kg, también por el empleo de otros materiales, que se verán reducidos a 46 kg en el límite de la reducción de peso.

Para hacernos una idea global de la repercusión que supone en la industria de la fundición de hierro, aplicando al caso de RENAULT, y considerando unas ventas de 3,7 millones de vehículos (de los que solamente el 40% son diésel), con las cifras de hoy día necesitan 375.000 T de hierro fundido. Cuando la proporción de vehículos eléctricos sea un 25% y el diésel solamente un 4% (¿2035?), serán 280.000 T, pero con el horizonte exclusivo de vehículos eléctricos y una máxima reducción de peso, la cifra quedaría en 220.000 T, un 40% menos que el nivel actual.

Esta evolución en las necesidades de piezas de hierro fundido por parte de los productores de automóviles parece inevitable, aunque su proceso depende de las exigencias de las regulaciones medioambientales y de las decisiones políticas, cara a la electrificación. De todas formas, parece probable una reducción anual de alrededor del 1,85% en el camino hacia 2035.



Piezas tradicionales de hierro fundido en el automóvil (peso medio por vehículo)

NOTA DE LA EDITORIAL

En España se producen anualmente alrededor del 1.000.000 de T de piezas fabricadas en hierro fundido, ocupando unas 7.500 personas, de los que el 70% se dirigen a la industria de automoción, muchas de ellas exportadas. Es evidente que el desarrollo de los acontecimientos expuestos tendrá fuerte influencia en la actividad de las empresas y que la evolución hacia una automoción sin motores de combustión no puede ser diseñada con criterios exclusivamente oportunistas, sean técnicos, comerciales o políticos.

Aunque, en esta perspectiva, se ha enfocado solamente la problemática de las piezas de hierro fundido, es evidente que otros procesos de producción también pueden verse afectados. La desaparición de los motores de combustión afectaría igualmente de forma importante a las fundiciones de aleaciones de aluminio, que elaboran unas 140.000 T anuales, de las que el 80% se destina al sector de la automoción.

Por otra parte, sería preciso introducir a nuestra industria de componentes para el automóvil en el campo de aquellos que actualmente no produce y que serán los realmente utilizados en ese imparable camino hacia la electrificación en un plazo más o menos largo.

Más información en http://www.feaf.es/ (FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE ASOCIACIONES DE FUNDIDORES) y en http://www.thewfo.com/contentfiles/downloads/44.pdf (WORLD FOUNDRY ORGANISATION).

Cod. 9404 | Tecnología industrial | 3310.04 Ingeniería de mantenimiento

Equipos inteligentes y conectados para optimizar su ciclo de vida

Intelligent and connected equipment to optimize its life cycle

Jone Uribetxebarria, Juan-Manuel Besga y Begoña Mendizabal
Ikerlan Technology Research Center (España)

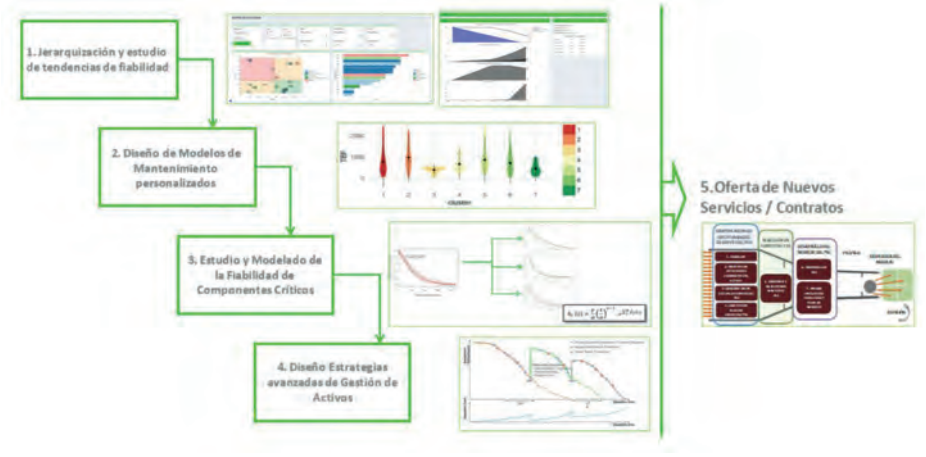
DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9404

En la actualidad, existe un interés generalizado de los fabricantes de equipos en diseñar e implementar una oferta de servicios orientada a asegurar y optimizar el ciclo de vida de sus equipos en las plantas productivas de sus clientes. Aprovechando las nuevas capacidades de sensorización, captación y transmisión de datos de los equipos 4.0, los fabricantes son capaces de registrar gran cantidad de información acerca del comportamiento del conjunto de sus máquinas en servicio (estado, anomalías de funcionamiento, parámetros del contexto en el que están operando, etc.). Esto posibilita el desarrollo de modelos avanzados de fiabilidad, que describen el comportamiento de los equipos en distintos contextos de operación, permitiendo una gestión personalizada de los mismos. Surgen así nuevos escenarios en los que los clientes demandan equipos inteligentes y conectados que les aseguren unos niveles de disponibilidad y rendimiento óptimos durante toda su vida útil, mediante contratos tipo PBC (*Performance Based Contracting*) unidos a indicadores de disponibilidad o rendimiento.

Para ayudar a las empresas a avanzar hacia dichos escenarios de servicios postventa, se ha definido un Marco de Gestión de Activos [1], que incluye una metodología orientada a estudiar y modelar el comportamiento de sus equipos y establecer estrategias de mantenimiento personalizadas. Las fases incluidas en la metodología son las siguientes:

1) *Jerarquización y estudio de tendencias de fiabilidad*: Se analiza la frecuencia de los modos de fallo y sus consecuencias, jerarquizándolos según su criticidad, y la variabilidad en el comportamiento de los equipos, identificándose las características técnicas y las variables de contexto operacional que más impactan en esta [2].
2) *Diseño de Modelos de Mantenimiento personalizados*: Se definen las estrategias de mantenimiento personalizadas a las necesidades reales del activo en cada contexto operacional, según la criticidad de los fallos. En el caso de parques compuestos por un elevado número de equipos, se segmenta la flota en 'clusters', considerando las similitudes entre sus características técnicas y los contextos en los que operan [3].
3) *Estudio y Modelado de la Fiabilidad de Componentes Críticos.* Se modela en detalle la fiabilidad real de los componentes críticos en distintos contextos operacionales, identificándose las variables de contexto más influyentes en el modo de fallo y adaptándose los modelos de fiabilidad a los distintos contextos.
4) *Diseño de Estrategias avanzadas de Gestión de Activos.* Se ajustan las estrategias de mantenimiento, a partir de los modelos de comportamiento definidos, evaluándose el impacto en los costes del ciclo de vida [4], permitiendo al fabricante ofertar estrategias de mantenimiento diferenciadas, según el contexto operacional [5].
5) *Identificación de Oportunidades y nueva Oferta de Servicios PSS.* El conocimiento generado en las anteriores fases posibilitará al fabricante diseñar el sistema de producto y servicio que mejor se ajuste a sus necesidades y a los intereses de sus clientes [6]

Las fases de esta metodología permiten a los fabricantes identificar nuevas oportunidades de servicios complementando su oferta de producto, aumentando el valor añadido de esta y, por tanto, asegurando la sostenibilidad de su negocio.



REFERENCIAS

[1] Castellano, E., Zubizarreta, P.X., Pagalday, G., Uribetxebarria, J., Crespo, A. (2016) Service 4.0: The Reasons and Purposes of Industry 4.0 within the Ambit of After-Sales Maintenance. In, Carnero, M.C. and and González-Prida, V. (2016) Optimum Decision Making in Asset management, IGI-Global 2016
[2] De Rocquigny, E., Devictor, N., Tarantola, S., 2008. Uncertainty in industrial practice: a guide to quantitative uncertainty management. John Wiley & Sons.
[3] J. Izquierdo, A. Crespo, J. Uribetxebarria (2019) Dynamic artificial neural network-based reliability considering operational context of assets. Reliability Engineering & System Safety, (188), 483-493, https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.054.
[4] Parra, C., Crespo, A., Kristjanpoller, F., & Viveros, P. (2012). Stochastic model of reliability for use in the evaluation of the economic impact of a failure using life cycle cost analysis. Case studies on the rail freight and oil industries. Journal of Risk and Reliability, 226(4), 392-40
[5] A. Erguido, A. Crespo, E. Castellano, J. Fernández. A dynamic opportunistic maintenance model to maximize energy-based availability while reducing the life cycle cost of wind farms. Renewable Energy. 2017
[6] Baines, T. S., & Lightfoot, H., 2013. Made to serve. How manufacturers can compete through servitization and product-service systems., John Wiley. ed. Chichester, UK.

Mecanizado de superficies regladas desarrollables mediante algoritmos matemáticos

Machining of developable ruled surfaces using mathematical algorithms

Amaia Calleja-Ochoa[1], Haizea Gonzalez-Barrio[1], Roberto Polvorosa-Teijeiro[2], Francisco Javier Amigo[2], Gaizka Gómez-Escudero[1], Pablo Fernández-de-Lucio[1], Michael Barton[3], Pengbo Bo[4] y Luis-Norberto López-de-Lacalle-Marcaide[1]

[1] Universidad del País Vasco UPV/EHU (España)
[2] CFAA (España)
[3] BCAM–Basque Center for Applied Mathematics (España)
[4] Harbin Institute of Technology (China)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9406

La industria demanda procesos de fabricación más eficientes para la producción de componentes de geometría compleja y materiales de baja maquinabilidad. En este sentido, el mecanizado de superficies regladas típicamente presentes en componentes geométricamente complejos del sector aeroespacial son objeto de estudio en este trabajo.

En general, las estrategias de fresado se clasifican en función de la superficie de contacto de la herramienta durante el mecanizado, diferenciándose dos tipos para geometrías complejas: fresado de punta conocido como '*point milling*' y fresado de flanco conocido como '*flank milling*'. La estrategia de fresado de punta se realiza con herramientas de corte de punta esférica y la eliminación del material se realiza con el lado esférico de la herramienta de fresado. El principal inconveniente esta estrategia reside en el alto tiempo de mecanizado y el desgaste extremo de la herramienta, ya que está cortando constantemente con la misma región de la herramienta. Por el contrario, en la estrategia de fresado de flanco, el mecanizado se realiza con la longitud total efectiva de la herramienta, por lo que la productividad de esta estrategia es mayor que en el caso de fresado de punta; Reduciendo los tiempos de mecanizado y aprovechando al máximo los filos de corte de la herramienta. No obstante, esta no siempre es una opción útil para las geometrías complejas porque la precisión de esta estrategia depende del tipo de superficie, por lo que es necesaria una superficie reglada desarrollable para su adecuada aplicación. Además, otro inconveniente de esta estrategia reside en la estabilidad de la operación, ya que está muy influenciada por los parámetros de corte definidos; Si no son los adecuados, existe la posibilidad de que aparezcan vibraciones, lo que conlleva requisitos de acabado inadmisibles. Además de eso, para materiales de baja maquinabilidad, se debe señalar que cuanto más grande sea el contacto entre la herramienta y la pieza, mayor será la potencia, la estabilidad, la evacuación de viruta y las capacidades de la máquina.

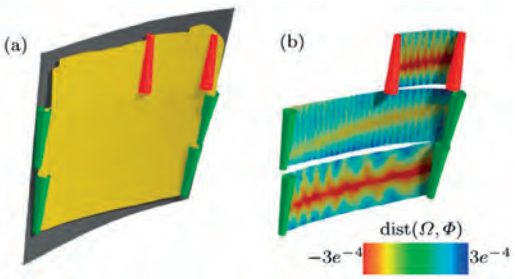


Fig. 1: a) Las superficies regladas (amarillas) representan los movimientos del eje de la herramienta. Las posiciones iniciales y finales (verde) representan las posiciones físicamente admisibles (verde). b) Se muestra el resultado de superficies mecanizadas por exceso (rojo) y por defecto (azul)

En aquellos casos en que las geometrías a mecanizar son superficies regladas desarrollables, el flanco de la herramienta se mantiene tangente a la superficie a lo largo de todo el eje de la herramienta. Por lo tanto, las estrategias de fresado de flanco mantienen ese contacto tangencial entre el eje de la herramienta y la superficie a lo largo de cada generatriz que define la superficie, permitiendo el uso de la longitud total efectiva de la herramienta como la profundidad de corte axial. Esto conduce a un proceso más productivo, con mayores tasas de eliminación de material y una reducción del tiempo y el costo de la máquina. Sin embargo, para garantizar la estabilidad y eficiencia del proceso se requiere el uso de herramientas de grandes dimensiones, reduciendo los riesgos de flexión y las apariencias de vibración inherentes a esta estrategia.

Tradicionalmente, las estrategias de flanco presentan la solución más productiva en términos de tiempos y costes de mecanizado; Es por eso que en los últimos años se han desarrollado muchos estudios para reducir el error de posicionamiento de la herramienta en relación con la generatriz de las superficies regladas no desarrollables. Los métodos de reposicionamiento de herramientas se dividen principalmente en dos tipos diferentes, analíticos y numéricos; Los primeros son más fáciles de implementar, pero los errores obtenidos son más grandes que los numéricos [1]. Algunos de estos trabajos publicados se centran en obtener una superficie para ser mecanizados utilizando estrategias de fresado de flancos que conservan las propiedades aerodinámicas y la integridad estructural cerca de la superficie original [2-3], otros desarrollaron técnicas de múltiples etapas de fresado de flancos. o personalización de la geometría de la herramienta según la superficie [4].

Sin embargo, una alternativa a los métodos de fresado de flanco y fresado de punta es el mecanizado de superficies regladas desarrollables calculadas mediante algoritmos matemáticos (Figura 1). Estos algoritmos [5] trabajan sobre el espacio entre superficies y el movimiento tangencial de un cono truncado a lo largo de una superficie doblemente curvada y de forma libre. Se definen líneas y posiciones discretas de ejes cónicos en el espacio 3D. El ajuste de superficie de spline se utiliza para generar una superficie reglada que representa un solo barrido continuo de una herramienta de fresado cónica rígida. Luego se aplica un enfoque basado en la optimización para minimizar globalmente el error entre la superficie de diseño y la envoltura cónica.

REFERENCIAS

[1] Senatore, J., Moniés, F., Rubio, W. 5-axis flank milling of sculptured surfaces. Machining of complex sculptured surfaces, 2012, London, Springer London. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2356-9_2 .
[2] Li, C., Mann, S., Bedi, S. Flank Millable Surfaces Generated via Polynomial Composition. Computer-Aided design and applications, 2007, 41-48. DOI: https://doi.org/10.1080/16864360.2007.10738524.
[3] Gong, H., Wang, N. Optimize tool paths of flank milling with generic cutters based on approximation using the tool envelope surface. Computer-Aided design, 2009, 981-989. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cad.2009.06.013.
[4] Wu, C.Y. Arbitrary surface flank milling of Fan, Compressor, and Impeller Blades. Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, 1995. DOI: https://doi.org/10.1115/94-GT-426.
[5] Calleja, A., Bo, P., Gonzalez, H., Barton, M., Lopez de Lacalle, L.N. Highly Accurate 5-axis Flank Cnc Machining With Conical Tools, International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 2018, Vol. 97 (5-8), 1605-1615. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-018-2033-7.

Cod. 9410 | Tecnología industrial | 3310.03 Procesos industriales

Propuesta metodológica de adaptación del *Value Stream Mapping* a modelos de simulación en entornos navales

Methodological proposal for the adaptation of Value Stream Mapping to simulation models in naval environments

Víctor Pérez-Fernández, Álvaro Gómez-Parra, Luis Lafuente y Jorge Salguero-Gómez
Universidad de Cádiz (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9410

Las directrices recogidas en la denominada *Factory of the Future* han servido de base para la puesta en marcha de la Industria 4.0, que en el entorno de la industria de la construcción naval se ha denominado *Astillero 4.0*, y que supone un cambio radical del paradigma de trabajo, basado en sistemas de fabricación tradicionales.

En un entorno altamente complejo, el gemelo digital será la piedra angular del *Astillero 4.0*, donde uno de los aspectos clave pasa por el modelado y simulación de los procesos de producción. Este planteamiento lleva a la necesidad de implantar una metodología que permita analizar, diagnosticar, proponer e implementar mejoras especialmente orientadas a la fabricación de grandes buques no seriados, dotando al sistema de flexibilidad y agilidad con el objetivo de incrementar su eficiencia y competitividad.

La técnica *Value Stream Mapping* (VSM) es una herramienta de diagnóstico ampliamente usada en *Lean Manufacturing,* que permite representar un mapa de valor del proceso productivo incluyéndose las redes completas de la cadena de suministro, los flujos de material y el de información que señalizan y controlan la producción [1]. No obstante, VSM presenta una serie de inconvenientes [2], como que es una técnica basada en papel y lápiz (poco precisa), el número de versiones manejables es bajo, es de difícil aplicación a gran variedad y bajo volumen de producción y, además, no es un método dinámico. Por tanto, si el proceso de producción es complejo, la herramienta no puede representar el flujo de valor real de forma fácil y precisa, siendo necesario complementarse con la aplicación de modelos de simulación de eventos discretos [3].

Dentro del marco de la *Unidad de Innovación Conjunta (UIC) NAVANTIA-UCA*, la línea de investigación de *Modelizado y Simulación* propone una alternativa complementaria al VSM para productos que requieren de flujos de procesos no lineales, caso de la *Unidad de Negocio Astillero Bahía de Cádiz de la empresa NAVANTIA*. De esta forma, se está desarrollando un procedimiento que integra el VSM tradicional con modelos de *Simulación de Eventos Discretos* (SED), para el análisis en tiempo real de los distintos procesos, a distintas escalas y en distintos escenarios, permitiendo predecir resultados de los entornos con las capacidades tradicionales de la propia herramienta (detección de cuellos de botella y estimación del lead-time), pero de forma dinámica en el tiempo.

La metodología consta de 6 pasos consecutivos: 1) Definición de la familia de producto. 2) Representación gráfica del estado actual (CVSM). 3) Simulación del estado actual (CSED). 4) Representación gráfica del estado futuro (FVSM). 5) Simulación del estado futuro (FSED). 6) Implementación. En paralelo, es necesario que el SED muestre el gemelo digital del proceso de producción a simular mediante: 1) Formulación del problema. 2) Selección de variables. 3) Desarrollo y validación del modelo conceptual. 4) Recogida de datos. 5) Desarrollo y verificación del modelo digital. 6) Validación del modelo. 7) Simulaciones, análisis y documentación de resultados [4].

Con este planteamiento, se persigue la obtención del gemelo digital de los procesos productivos mediante el modelado y simulación en el *Astillero 4.0*. Para ello, se está utilizando *FlexSim* como aplicación SED, que mediante la programación gráfica en *Process Flow* (PF) de los flujos de valor, permitirá adaptar el modelo al sector naval, combinando PF y lógica 3D para crear la simulación rápida y dinámica.

REFERENCIAS

[1] ROTHER, Mike; SHOOK, John. Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda. Lean Enterprise Institute, 2003.
[2] DAL FORNO, Ana Julia, et al. Value Stream Mapping: a study about the problems and challenges found in the literature from the past 15 years about application of Lean tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, vol. 72, nº 5-8, p. 779-790. DOI: 10.1007/s00170-014-5712-z
[3] AZIZ, Zeeshan; QASIM, Rana Muhammad; WAJDI, Sahawneh. Improving productivity of road surfacing operations using value stream mapping and discrete event simulation. Construction Innovation, 2017, vol. 17, nº 3, p. 294-323. DOI: 10.1108/CI-11-2016-0058
[4] MANUJ, Ila; MENTZER, John T.; BOWERS, Melissa R. Improving the rigor of discrete-event simulation in logistics and supply chain research. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2009, vol. 39, nº 3, p. 172-201. DOI: 10.1108/09600030910951692



Mercado online de proveedores y bienes de equipo

Online marketplace for suppliers and manufacturing equipment

Luis Usatorre[1], Mikel Niño[1], Patricia Tames[2] y Ana Gorrochategui[3]
[1] Tecnalia Research and Innovation (España)
[2] AFM (España)
[3] INVEMA (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9409

La digitalización de la industria ha cambiado la forma en la que gestionamos los procesos productivos o en la que compramos materias primas e incluso la forma de comunicarnos internamente y externamente con clientes y proveedores. Sin embargo, la digitalización todavía no ha penetrado con éxito en otras fases de la comunicación, como es poner en contacto necesidad y oferta a través de plataformas digitales. Es decir, la compra de equipos o la selección de proveedores. Actualmente existen varios mercados electrónicos disponibles en línea (*marketplaces*) para materializar las relaciones entre empresas (B2B), en concreto entre los proveedores de equipos de producción y los fabricantes de productos finales (OEM). También existen los portales que relacionan clientes y proveedores. Sin embargo, adolecen de varias limitaciones por lo que este artículo propone una nueva solución.

Por lo general, son portales web o soluciones de administración de la cadena de suministro impulsados por los proveedores de ERP. Aquí, los compradores y proveedores se reúnen para explorar nuevas oportunidades de negocios. Estas plataformas generalmente ofrecen servicios similares a los de un catálogo a clientes que buscan equipos de producción o servicios relacionados. La búsqueda y la concordancia entre la oferta y la demanda se ofrecen a través de servicios tales como taxonomías de equipos de producción, opciones de búsqueda, hojas de datos técnicos del equipo de producción y, en algunos casos, videos o animaciones predefinidas del equipo de producción. Existen varias barreras para los fabricantes finales que limitan su posibilidad de explotar completamente estos mercados electrónicos tradicionales:

En muchos casos, un gran OEM impulsa el mercado electrónico para respaldar sus procesos de adquisición y cadena de suministro. Dado que un proveedor de equipos suele vender a varios de estos fabricantes, deben utilizar múltiples mercados, lo que conlleva una mayor carga administrativa y limita el potencial para captar los beneficios de dicho mercado (por ejemplo, en términos de visibilidad y configuración colaborativa del producto).

Las piezas o subproductos y los equipos de producción son productos complejos. Los mercados electrónicos existentes a menudo se limitan al intercambio de títulos de productos, hojas de datos estáticas, precios y disponibilidad. Proponemos incluir capacidades adicionales, como la configuración, visualización y prueba de productos. Esto incluye la capacidad de compartir tipos adicionales de datos como geometrías, verificación de cumplimiento de estándares y simulación.

Otra oportunidad perdida es que a pesar de que los fabricantes de equipos de producción, ya sean grandes o pymes, tienen representaciones de Gemelo Digital (*Digital Twin*) de sus productos, no pueden ofrecer funcionalidades de simulación a los usuarios potenciales para probar virtualmente sus productos a través de estos modelos de simulación debido a la falta de infraestructura segura y confiable. Las grandes empresas proveedoras de equipos de producción a través de sus portales web pueden proporcionar animaciones de equipos de producción para varios escenarios, en diferentes circunstancias. Sin embargo, tales plataformas de comercio electrónico no son genéricas en términos de pruebas de funcionalidad y simulación, ya que pueden funcionar básicamente para configuraciones

Nuestro planteamiento apunta a un enfoque múltiple, proporcionando un mejor posicionamiento de los proveedores tanto de equipos como de piezas o subproductos, de tal forma que esta plataforma se convierta en la herramienta principal de apoyo principalmente a PYMES, para que sus activos nunca estén parados y accedan a un mercado global sin repercutir en mayores gastos comerciales

Por un lado, abordamos una plataforma digital automatizada donde empresas demandantes de fabricación de piezas dispongan de una forma rápida, fácil y eficiente de empresas proveedoras que cumplan sus requisitos técnicos y de coste. Por otro, las plataformas digitales permitirán a los fabricantes de equipos trabajar con sus clientes, fortaleciendo su propuesta de valor y aumentando su competitividad. Para ello, los proveedores de equipos tienen acceso a datos, gracias a una infraestructura de igual a igual que respalda los contratos inteligentes B2B, y que permite desarrollar nuevos modelos de negocio incluyendo servicios de modelado y simulación de terceros, mediante un ecosistema P2P.

REFERENCIAS

[1] Chen, Y. H., Y. Z. Wang, and M. H. Wong. 2001. "A Web-Based Fuzzy Mass Customization System". Journal of Manufacturing Systems 20 (4):280–87. https://doi.org/10.1016/S0278-6125(01)80047-9.
[2] Chryssolouris, G., N. Papakostas, and D. Mavrikios. 2008. "A Perspective on Manufacturing Strategy: Produce More with Less." CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 1 (1):45–52. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.06.008.
[3] "A knowledge-based framework for PSS design and manufacturing", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Nantes May 2018 https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85052997918&origin=SingleRecordEmailAlert&dgcid=raven_sc_search_en_us_email&txGid=74eec531732ba2a935723c4478965816
[4] Chris Decubber 1 — Sergio Gusmeroli 2 — Guy Doumeingts 3 — Domenico Rotondi 4 — Fenareti Lampathaki 5 — Luis Usatorre Irazusta 6 - Technological and Organizational Pathways towards 2025 Collaborative Product-Service Connected Factories of the Future (I-ESA conference Berlin, 21st March 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradecer la colaboración de los centros tecnológicos LMS y TNO y en particular de Kosmas Alexopoulos y Mathijs Punter.

Cod. 9372 | Tecnología industrial | 3310.03 Procesos industriales

Realidad frente a expectativas en la impresión 3D actual

Reality versus expectations in current 3D print

Níobe Alonso, Manuel Domínguez y María del Mar Espinosa
Universidad Nacional de Educación a Distancia (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9372

La impresión 3D tiene lugar, al principio de la década de los ochenta del siglo pasado, gracias a dos factores fundamentales: el desarrollo de las resinas fotopolimerizables y el desarrollo de los sistemas de fabricación computerizados. Por supuesto, la tecnología de la impresión 3D va mejorando día a día, y algunas de las expectativas creadas hace unos años, aún no resueltas, pueden ser una realidad dentro de unos años. Pero la comparación a fecha de hoy nos puede dar una idea de cómo va a ser también la realidad de estas técnicas en un futuro cercano, en comparación con las expectativas creadas.

Para el desarrollo de este artículo se ha tomado como punto de partida el trabajo de Jiménez [1] en el que se hace una valoración de la impresión 3D con el objetivo de prever su evolución en un futuro cercano. Se ha hecho un estudio de campo, se ha realizado una extensa valoración de las referencias bibliográficas más relevantes en el tema y se ha contactado con empresas, investigadores y profesionales del sector.

Los trabajos de Domínguez [2] y Guerrero [3] aportan una situación del sector en el campo de la arquitectura y en la industria que sientan las bases sobre las que se fundamenta este trabajo. Los trabajos de Alonso [4] recogen los primeros resultados, haciendo una exposición exhaustiva de la bibliografía analizada así como de los resultados previos.

Los usos y aplicaciones actuales de la impresión 3D son ya difícilmente contables, y los campos de aplicación siguen creciendo de día en día. Con un avance tan vertiginoso, las expectativas que se crean suelen ser difíciles de alcanzar. A continuación se recoge un resumen de los resultados obtenidos en los que se presenta la expectativa creada en su momento y la realidad actual en 2019:

- Expectativa: Los consumidores serán también fabricantes.
- Realidad: Parcialmente verdadero. Se pueden crear objetos en el ámbito doméstico, pero la creación de modelos 3D sigue siendo trabajo de profesionales.

- Expectativa: La impresión 3D ayudará a los diseñadores a iterar más rápida y económicamente.
- Realidad: Verdadero.

- Expectativa: Se usarán máquinas de impresión 3D en todas las oficinas de diseño.
- Realidad: Parcialmente verdadero. La mayoría de las empresas en el ámbito del diseño tienen ya una o varias impresoras 3D.

- Expectativa: Se pueden usar técnicas de impresión 3D para hacer herramientas.
- Realidad: Parcialmente verdadero.

- Expectativa: Se pueden crear piezas finales mediante técnicas de impresión 3D.
- Realidad: Parcialmente verdadero. Depende del tipo de pieza y de su uso.

- Expectativa: Se podrán crear órganos vivos impresos en 3D.
- Realidad: Falso a día de hoy. Se han conseguido imprimir algunos tejidos, pero en un ámbito de centros de investigación. Todavía no están disponibles estas técnicas de forma habitual en hospitales.

- Expectativa: La comida será impresa en 3D.
- Realidad: Falso. Se utilizan técnicas de impresión 3D con fines concretos, pero a día de hoy no es habitual ni rentable.

- Expectativa: Se podrán imprimir casas.
- Realidad: Parcialmente verdadero. Existen edificaciones hechas con estas técnicas, pero su creación *in-situ* todavía presenta muchas complicaciones.

En cuestión de años en todos los campos se ha hecho un gran avance, pero a veces las expectativas pueden resultar difíciles de alcanzar por razones técnicas o porque requieren una mayor exploración y experimentación. Consideramos que estudios como éste realizados cada cierto tiempo pueden ayudar a apreciar el desarrollo de las técnicas, la aparición de nuevas tendencias y saber dónde están los límites de las técnicas actuales.

REFERENCIAS

[1] M. Jiménez et al, «Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects», Complexity, vol. 2019, pp. 1-30, feb. 2019. DOI: https://doi.org/10.1155/2019/9656938
[2] I.A. Domínguez et al, «3D Printing of Models and Prototypes in Architecture and Construction», Revista de la Construcción, vol. 12, n.o 2, pp. 39-53, 2013. DOI: https://doi.org/10.4067/s0718-915x2013000200004
[3] A. Guerrero et al, «3D Printing: Unit Plan Proposal», Ingeniería Educativa, vol. 10, pp. 12-16, 2016. http://www.ingenieriaeducativa.com/papers/n9/revista10-4.pdf
[4] N. Alonso et al, «Revisión de las expectativas y la realidad en técnicas de fabricación aditiva», DYNA New Technologies, Enero-Diciembre 2019, vol. 6, no. 1, [9 p.]. DOI: http://dx.doi.org/10.6036/NT9251

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a apoyo dado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) en el marco del Proyecto 2019-ICF06.

Energía renovable de briquetas de biomasa y aglutinantes orgánicos

Renewable energy of biomass briquets and organic binders

Paul Diaz-Márquez y Elmer Benites-Alfaro
Universidad César Vallejo (Perú)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9429

En lugares en donde la energía es escasa o no existe a disposición lo suficiente, el uso de briquetas a base de biomasa animal o vegetal puede ayudar a suplir esa necesidad. Los residuos de la producción de café, cacao y trigo denominadas cascarillas y a la vez aglutinadas con residuos de patata y melaza, fueron aprovechadas para elaboración de briquetas que presentaron buen poder calorífico con promedio de 9 909.59 Kcal/Kg (cacao), 9 912.81 Kcal/Kg (café) y 9 928.11 Kcal/Kg trigo) respectivamente [1]. Este producto es alternativa con ventajas ambientales en la obtención de fuentes de energía, dando valorización a estos residuos para una gestión más aprovechable y sostenible dentro del enfoque de la economía circular, donde minimizar los residuos es uno de sus principios; es decir transformarlos para aprovechándolos para otros fines [2].

La elaboración de las briquetas siguió tres etapas: recolección de los residuos cascarilla de cacao, café y trigo de lugares donde se procesa estos alimentos, luego la elaboración de los prototipos de briquetas usando en promedio 53, 71 y 26% de biomasa (cascarilla) y finalmente se realizó el cálculo del potencial calorífico. Este proceso de utilizar los residuos antes que eliminarlos constituye una manera de incorporarlos a la cadena de beneficios de la industria de productos agroalimenticios, para generar un aprovechamiento energético, conforme se observa en la Fig. 1, concordante con un principio de la Directiva Marco de Residuos de la UE [3].

En las briquetas elaboradas en la investigación de Benites y Diaz (2019), se aprovecharon un promedio de 57.6, 66 y 55 g de biomasa cascarillas de cacao, café, trigo y aglutinantes por cada briqueta, que equivale a una cantidad considerable de residuos en una producción a escala mayor.

También en la fabricación de las briquetas se encontró que la humedad es un parámetro a tener presente por influir en el potencial calorífico, a mayor humedad de la biomasa menor será el poder calorífico (García, 2016), por lo que se debe controlar de la mejor manera. En la investigación efectuada se observó que la biomasa de trigo tuvo menor humedad (4.63 %), seguido de las biomasas de café (7.14 %) y cacao (9.99 %).

Aprovechar recursos como los residuos de biomasa de cacao, café y trigo en forma de briquetas, resulta ser una posibilidad práctica de uso en las zonas de poblaciones como por ejemplo zonas rurales del Perú para solución a problemas de escases de combustibles y consecuentemente mejorar la calidad de vida de éstos ayudándolos a enfrentar fenómenos naturales como heladas y friaje. Es decir resulta ser la aplicación del principio de la economía circular como tendencia a encontrar las sostenibilidad y cuidado del medio ambiente.

Se debe tener en cuenta las características fisicoquímicas de esta biomasa sobre todo la humedad a fin de conseguir mejor eficiencia en el poder calorífico. También resultaría interesante comparar el poder calorífico y tiempo de combustión de esta biomasa en otra forma de presentación como los pellets muy usado con similares biomasas, considerando que la Agencia Internacional de la Energía (AIE) indica que una tonelada de biomasa cáscara es igual a 0.2000 Ketp (energía que libera la combustión de una tonelada de petróleo crudo).

Se recomienda que en la mejora del potencial calorífico en el proceso de elaboración de las briquetas de cascarilla de cacao, café y trigo, estas biomasas sean sometidas a un proceso de torrefacción [4], así como también ensayar no solo en forma de briquetas sino como pellets.

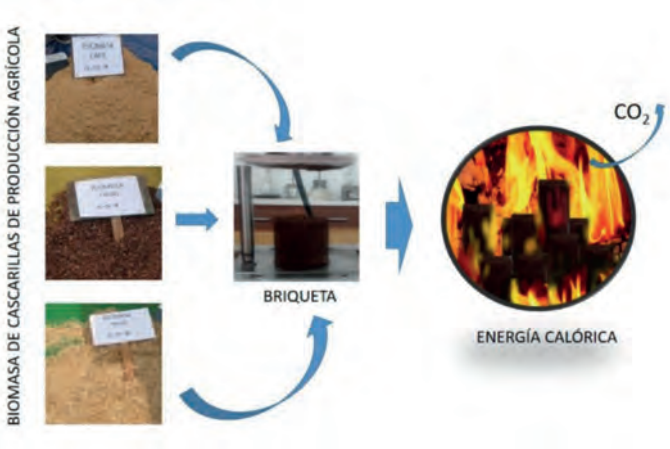


Fig. 1: Biomasa de residuos de cacao, café y trigo en la economía circular

REFERENCIAS

[1] Benites-Alfaro, E., Diaz-Marquez, P. (2019). CALORIFYING POWER OF BRIQUETAS ELABORATED WITH BIOMASS AND ORGANIC AGGLUTANTS. DYNA Energía y Sostenibilidad, 8(1). [12 p.]. DOI: http://dx.doi.org/10.6036/ES9113

[2] Stahel W. (2016), Circular Economy. Nature, 531 (2016), pp. 435-438. https://www.nature.com/news/polopoly_fs/1.19594!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/531435a.pdf

[3] Unión Europea (2018). Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (Texto pertinente a efectos del EEE). Diario Oficial de la Unión Europea. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705&tfrom=SK

[4] García L. (2016). Densificación y torrefacción de biomasa de chumbera (Opuntia Spp. y Jara (Cistus Spp.). 125 pp. http://oa.upm.es/44252/1/TFG_LUCIA_GARCIA_MARTINEZ.pdf

Cod. 9560 | Teoría y métodos educativos | 5801.99 Otras

Estudio de los masteres en Ingeniería Industrial en las Universidades españolas

Study about masters in industrial engineering at Spanish Universities

José-Esteban Fernández-Rico[1], Fernando Guijarro-Merelles[2] y Alberto Álvarez-Suárez[1]
[1] Universidad de Oviedo (España)
[2] Colegio de Ingenieros Industriales de Extremadura (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9560

1. INTRODUCCIÓN

El Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Industriales de España, con la colaboración de la Conferencia de Directores de las Escuelas ha llevado a cabo un estudio de los másteres en Ingeniería Industrial del sistema universitario español con el objeto de promover en lo posible la convergencia de los planes de estudio, y su desempeño, con la profesión regulada de Ingeniero Industrial.

El Consejo General de Colegios de Ingenieros Industriales de España es una corporación que agrupa a los 21 Colegios profesionales, cuya misión fundamental es ordenar el ejercicio de la profesión, ostentando la representación exclusiva de la profesión y su defensa [1]. La Conferencia de Directores de las Escuelas que imparten el máster en Ingeniería Industrial está constituida por sus Directores y pretende promover los vínculos, estrategias y actuaciones de interés común que redunden en la competitividad y calidad de los másteres y su adaptación a los cambios regulatorios.

En el presente artículo se presentan las conclusiones principales del estudio que evidencian fortalezas en los mejores casos de desempeño, relacionadas con la calidad del máster, las colaboraciones con entidades y tejido empresarial, y la internacionalización. Por otro lado se aportan las mejoras, en las Escuelas con resultados por debajo de la media, que deberían centrarse en los ámbitos de RRHH, soporte al plan de estudios, indicadores de tasas y satisfacción y la relación con el entorno (entidades colaboradoras, prácticas de estudiantes y movilidad).

2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El proyecto consistió en realizar un estudio sobre los másteres en Ingeniería Industrial de las distintas Universidades españolas, para analizar y conocer sus características, el enfoque profesional y su vinculación con el entorno e internacional, evidenciando las fortalezas y las posibilidades de mejora de su calidad, para añadir valor a las partes interesadas, especialmente empleadores y sociedad.

La aplicación del plan Bolonia al sistema universitario español supuso cambios muy significativos en la oferta y estructura de los títulos académicos, incluso en el caso de estudios vinculados con las profesiones reguladas. En relación con la profesión de ingeniero industrial, fue la Orden CIN/311/2009, de 9 de febrero, la que estableció los requisitos de verificación de los títulos universitarios oficiales que habilitaran para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Industrial. El marco legal general permitió a las Universidades estructurar los másteres con una horquilla de 60 a 120 créditos, generándose en consecuencia una significativa diversidad de planes, a lo que se une la diversidad de Escuelas, en muchos casos con la tradición de haber impartido la titulación de Ingeniero Industrial, anterior a Bolonia, y en otros implantando el máster en Ingeniería Industrial por primera vez.

Esta realidad, bien conocida por el Consejo General de Colegios de Ingenieros Industriales, propicia que el Consejo impulse un estudio sobre los másteres en Ingeniería Industrial, al objeto de posibilitar la mayor convergencia entre la enseñanza del máster y la profesión del ingeniero industrial, como profesión regulada por el decreto de atribuciones de Septiembre de 1935 [2].

En este marco, resultaba imprescindible la participación de las Escuelas y, para conseguir esto, se solicitó la colaboración de la Conferencia de Directores. Los responsables de los Centros donde se forman los futuros Ingenieros Industriales, aunque por razones diferentes a las del Consejo General, también tenían interés en conocer la situación de los másteres ofertados y propiciar la mejora de estos estudios. Al mismo tiempo la colaboración con las corporaciones profesionales supone una fuente de información muy valiosa sobre lo que demandará el mercado a los estudiantes que se están formando hoy. Los objetivos planteados en el estudio fueron:

a) Promover la mejora de la calidad de los másteres.
b) Facilitar el benchmarking entre Escuelas para estimular la competitividad de los estudios, en el marco de la proliferación de títulos de máster sin atribuciones profesionales.
c) Valorar la adaptación de los másteres a la profesión de Ingeniero Industrial.

Esta preocupación por mejorar la formación de los futuros ingenieros, es una actividad muy frecuente entre las asociaciones que representan a los profesionales en muchos países. Ejemplos destacados en este sentido son el sistema de acreditación establecido por la *Accreditation Board for Engineering and Technology* (ABET) [3], o el promovido por el *Engineering Council* británico [4].

3. METODOLOGÍA UTILIZADA

El estudio se lleva a cabo en los cursos 2016-2017 y 2017-2018 siguiendo la metodología que se expone muy brevemente a continuación:

a) Elaboración de un cuestionario a trasladar a las Escuelas para la recogida de información. El cuestionario se estructuró en 10 bloques: 1. Información general, 2. Recursos humanos, 3. Ingreso, 4. Plan de estudios, 5. Resultados, 6. Contexto formativo, 7. Internacionalización, 8. Calidad del Máster, 9. Enfoque profesional y 10. Varios.
b) Recepción de respuestas.
c) Análisis de la información recibida de acuerdo a la valoración-ponderación establecida para los bloques del cuestionario.
d) Elaboración de una memoria de respuestas.

e) Elaboración de los documentos de conclusiones para cada Escuela participante.
f) Envío de documentos finales a Escuelas y Colegios de Ingenieros Industriales.

Es necesario señalar que las encuestas se cumplimentan por las propias Universidades según su criterio, salvo en aquellos casos en que los datos se refieren indicadores tipificados en el sistema de información universitaria. La respuestas fueron archivadas en las bases de datos sin opción posible de manipulación, manteniendo en todo momento la trazabilidad y cadena de custodia correspondiente.

Por otra parte los autores del estudio discriminaron respuestas consideradas anomalas para el contexto de la pregunta, indicándolo en el compendio del conjunto de datos considerado, lo que facilitó la homogeneización de las respuestas.

Además se acopió la información oficial de cada uno de los masteres en ingeniería industrial que se imparten en el sistema universitario español. El trabajo se realiza por tanto contando con la colaboración de los diferentes Centros evitando los problemas de desconfianza tradicionales en otros estudios similares [5]

	Curso 2016/2017	Curso 2017/2018
1. Información general	28 Respuestas (61%)	23 Respuestas (50%)
2. Recursos humanos[I]	19 Respuestas (41%)	21 Respuestas (46%)
3. Ingreso[II]	26 Respuestas (57%)	22 Respuestas (48%)
4. Plan de estudios	23 Respuestas (50%)	20 Respuestas (43%)
5. Resultados[III]	19 Respuestas (41%)	16 Respuestas (35%)
6. Contexto formativo	23 Respuestas (50%)	20 Respuestas (43%)
7. Internacionalización	23 Respuestas (50%)	21 Respuestas (46%)
8. Calidad del máster	23 Respuestas (50%)	22 Respuestas (48%)
9. Enfoque profesional[IV]	21 Respuestas (46%)	12 Respuestas (23%)
10. Varios[V]	19 Respuestas (41%)	11 Respuestas (24%)

Tabla 2: Porcentaje de respuestas por bloque tematico y por curso

Universidad	2016/17	2017/18
Universidad A Coruña	✓	✓
Universidad Antonio de Nebrija	✓	✓
Universidad Carlos III de Madrid	✓	✗
Universidad de Burgos	✓	✓
Universidad de Cantabria	✓	✓
Universidad de Castilla-La Mancha	✗	✓
Universidad de Córdoba	✓	✓
Universidad de Deusto	✗	✓
Universidad de Extremadura	✓	✓
Universidad de Girona	✗	✓
Universidad de Huelva	✓	✗
Universidad de Jaén	✗	✓
Universidad de Jaume I	✓	✓
Universidad de La Laguna	✓	✗
Universidad de las Islas Baleares	✓	✓
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	✓	✗
Universidad de León	✓	✗
Universidad de Lleida	✓	✗
Universidad de Málaga	✓	✗
Universidad de Mondragón	✗	✓
Universidad de Oviedo	✓	✓
Universidad de Sevilla	✓	✓
Universidad de Valladolid	✓	✓
Universidad de Vigo	✓	✓
Universidad de Zaragoza	✓	✗
Universidad del País Vasco	✓	✓
Universidad Miguel Hernández de Elche	✓	✗
Universidad Politécnica de Cataluña	✓	✓
Universidad Politécnica de Valencia	✓	✓
Universidad Pontificia Comillas	✓	✓
Universidad Pública de Navarra	✓	✓
Universidad Ramón Llull	✓	✓
Universidad Rey Juan Carlos	✓	✗
	Total ✓ 28	Total ✓ 23

Tabla 1: Universidades participantes en el estudio por curso

4. MATRIZ DE RESPUESTAS

La Tabla 1 presenta por orden alfabético las Universidades que participaron en el estudio.

La Tabla 2 muestra los datos de respuesta relativos a las Universidades participantes, en relación a las 46 consideradas que imparten el máster, estructuradas de acuerdo a los 10 bloques del cuestionario que se trasladó a las Escuelas.

A la vista de los porcentajes, en el curso **2016-2017** se puede concluir que la **media** de las Universidades que contestaron fue del **48,3%,** mientras que en el curso **2017-2018** fue del **40,6%,** porcentaje que aumenta al **44,8%** si no se consideran los porcentajes de participación de los bloques 9 y 10 del cuestionario, destacadamente bajos, 23 y 24% respectivamente.

I) Aunque las respuestas en general aplican a la mayor parte de las preguntas, pocas Universidades las responden completamente. Se evidencian diferencias a la hora de interpretar el concepto de la pregunta.
II) No se ha observado ninguna dificultad para responder a las preguntas de este bloque.
III) Muchas de las preguntas de este bloque no tuvieron respuesta.
IV) Se evidencian dificultades a la hora de responder a las preguntas de este bloque, fundamentalmente porque en muchos casos no se dispone de mecanismos para el seguimiento de egresados.
V) En este bloque muchos centros registran anotaciones en referencia a las dificultades encontradas a la hora de responder el cuestionario, además de observaciones aclaratorias a sus respuestas.

5. ANÁLISIS SOBRE LOS RESULTADOS DE LA VALORACIÓN DEL CUESTIONARIO

Los histogramas de las Figuras 1 y 2 muestran, para los siete intervalos considerados, en una escala de frecuencias de 1 a 10, el número de Universidades que se sitúan en cada intervalo, según la puntuación obtenida en la valoración de los seis bloques ponderados (numeros 2, 4, 5, 6, 7 y 8) del cuestionario.

La comparativa de los histogramas evidencia la mejora del curso 2017-2018 respecto al 2016-2017, puesto que se incrementó el número de Universidades en los intervalos en torno a la media, reduciéndose el número de Universidades en el intervalo (0-1,4), que es la cola de menor puntuación del estudio.

Por otra parte, el histograma del curso 2017-2018 se aproxima a la distribución normal, mientras que el del curso 2016-2017 no sigue este comportamiento, presentando dos modas. Lo cual confirma también un mayor alineamiento en el curso 2017-2018 en relación con la experiencia piloto anterior.

6. PORCENTAJES EN RELACIÓN A LA MEDIA

6.1. CURSO 2017-2018

A continuación se analizan los porcentajes de Universidades, por encima y por debajo de la media, para los bloques del cuestionario considerado, Figura 3. Y los porcentajes de respuesta obtenidas, con la media asociada, también para cada bloque considerado Tabla 3.

El primer bloque del cuestionario considerado para la ponderación, **RRHH,** obtuvo respuestas del 91,30% de las 23 Universidades que contestaron al cuestionario. Y de éstas, el 42,85% obtienen una valoración superior a la media, mientras que el 57,15% muestran una valoración inferior.

El segundo bloque considerado para la valoración, **Plan de Estudios**, obtuvo respuestas del 91,30% de las 23 univerisidades que contestaron. Y de éstas, el 52,38% ha logrado una valoración superior a la media, mientras que el 47,62% obtienen una valoración inferior a la media.

El tercero, **Resultados**, obtuvo respuestas del 78,26% de las 23 Universidades que contestaron. Y de éstas, el 56,52% logra una valoración por encima de la media, mientras que el 43,48% se situan por debajo.

El cuarto, **Contexto Formativo**, obtuvo respuestas del 91,30% de las 23. Y de éstas, el 43,47% obtiene una valoración por encima de la media, mientras que el 56,53% está por debajo.

El quinto, **Internalización**, obtuvo respuestas del 91,30% de las 23 Universidades que respondieron. Y de éstas, el 52,38% supera la media, mientras que el 47,62% se sitúa por debajo.

El sexto y último apartado del cuestionario considerado para la valoración, **Calidad del Máster**, obtuvo respuestas del 95,65% de las 23. Y de éstas, el 90,90% se situan por encima de la media de las Universidades, mientras que el 9,10% obtienen una valoración inferior a la media.

6.2. CURSO 2016-2017

La interpretación del diagrama de barras del curso 2016-2017, Figura 4 y Tabla 4, es similar a la expuesta en el epígrafe anterior para el curso 2017-2018, por lo que se prescinde de más comentario.

7. ASPECTOS DE MEJORA (CURSO 2017-2018) Y MEJORES PRÁCTICAS

Del análisis llevado a cabo se desprenden

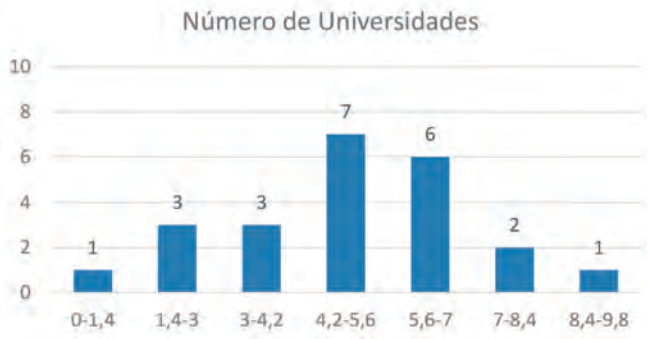


Figura 1: Universidades participantes en el estudio en el curso 2017-2018

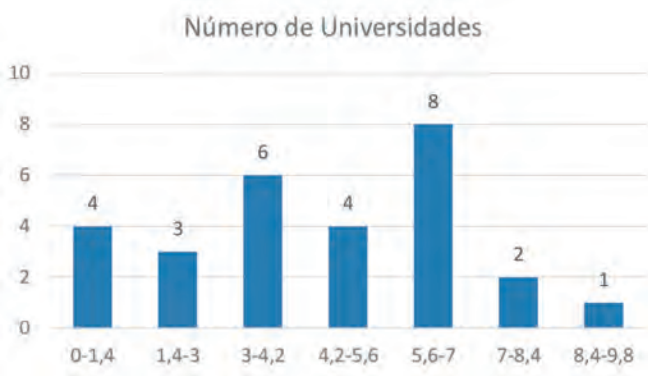


Figura 2: Universidades participantes en el estudio en el curso 2016-2017

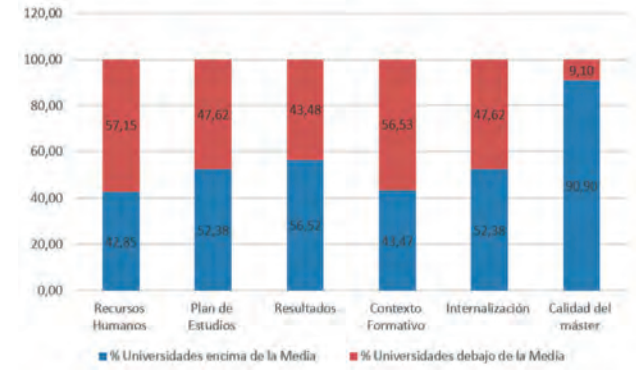


Figura 3: Porcentaje de Universidades respecto al valor medio de cada bloque temático

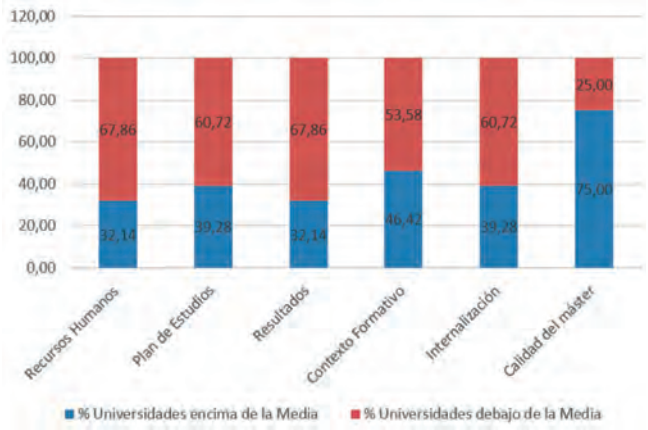


Figura 4: Porcentaje de Universidades respecto al valor medio de cada bloque temático

	Recursos Humanos	Plan de Estudios	Resultados	Contexto Formativo	Internalización	Calidad del máster
% Respuestas obtenidas de las 23 Universidades	91,30	91,30	78,26	91,30	91,30	95,65
Media de Universidades	3,4	4,7	4,0	4,7	6,9	8,1

Tabla 3: Porcentaje de respuestas y puntuación media por bloque temático

	Recursos Humanos	Plan de Estudios	Resultados	Contexto Formativo	Internalización	Calidad del máster
% Respuestas obtenidas de las 23 Universidades	85,71	82,14	64,28	82,14	82,14	82,14
Media de Universidades	3,4	5,7	5,4	4,2	7,8	9,4

Tabla 4: Porcentaje de respuestas y puntuación media por bloque temático

den los datos que figuran a continuación, relativos al número de Universidades, de las 23 que respondieron al cuetionario, que deben mejorar en los aspectos incluidos en los bloques del cuestionario que se mencionan.

- **Recursos humanos**: 13 Universidades.
- **Plan de estudios**: 12 Universidades.
- **Resultados**: 11 Universidades.
- **Contexto formativo:** 11 Universidades.

En consecuencia, se podría decir que una de cada dos Universidades que participaron en el estudio deben mejorar en RRHH, Plan de Estudios, Resultados y Contexto Formativo (en los ámbitos asociados a las preguntas incluidas en dichos bloques). Es decir, en términos de porcentaje, que de las 23 Universidades que contestaron el cuestionario, aproximadamente un 50% debe mejorar en 4 de los 6 bloques considerados para la valoración.

Entre las mejores prácticas destacan la calidad del máster, las colaboraciones de las Escuelas con organizaciones territoriales y tejido empresarial, y la intenacionalización, incluso con dobles titulaciones.

8. INFORME A LAS ESCUELAS

La información y los datos recibidos de las Escuelas que participaron en el estudio, como respuesta a las preguntas del cuestionario en su conjunto, fue procesada minuciosamente. A la vez, se estableció una valoración específica para cada uno de los seis bloques del cuestionario citados, aplicando también un criterio de ponderación y valoración particular de las propias preguntas que conforman cada bloque.

Como consecuencia, en cada curso se elaboró un informe final, de carácter general, que se envió a todas las Escuelas, participantes o no. Además, en el caso de tratarse de Escuela participante, se incluyó un breve informe ejecutivo con cuatro apartados, en el que se evidenciaba fácilmente el posicionamiento de la Escuela en cada bloque del cuestionario, en relación con la media de las Universidades que participaron.

De esta forma se pretendió facilitar a los Centros participantes las fortalezas del máster y las posibles actuaciones de mejora, facilitando el benchmarking.

9. CONCLUSIONES

El estudio sobre los másteres en Ingeniería Industrial del curso 2017-2018, posterior a la experiencia piloto del curso 2016-2017, reafirma la importancia e interés del mismo, ya que proporciona un valioso mapa de referencias sobre la realidad académica, favoreciendo el camino hacia la mejora y excelencia de estos estudios, fundamentales para la profesión de Ingeniero Industrial y, en consecuencia, para el desarrollo industrial y económico de nuestro país.

Por otra parte, en el curso 2017-2018, se constata la mejora de los resultados, en relación con la experiencia piloto del curso 2016-2017, al aumentar el porcentaje de Universidades con valoraciones por encima de la media en cinco de los seis bloques del cuestionario ponderados.

Además, también en el curso 2017-2018, se puede decir que se redujo de manera significativa la abstención en algunos apartados del cuestionario, en relación con la experiencia piloto, lo que indica que ha sido positiva la disposición de las diferentes Universidades, facilitando mayor cantidad de datos e información, y ofreciendo una participación muy activa en el estudio, lo que evidencia la importancia y trascendencia del mismo.

En un ámbito de más detalles, además de las conclusiones citadas en la INTRODUCCIÓN, se establecieron conclusiones respecto a preguntas concretas del cuestionario.

Entre ellas destaca, sin consideraciones sobre la calidad del empleo, que la inserción de los egresados se realiza en poco tiempo y, en muchos casos, asociada a la movilidad.

Por otra parte, se se tiene en cuenta el documento "Esenciales Nº 40" de Octubre de 2019 de la Fundación BBVA [6], se constata la fortaleza de la profesión de ingeniero industrial.

REFERENCIAS

[1] BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO núm. 175, de 22 de julio de 2000, páginas 26212 a 26221.

[2] Gaceta de Madrid núm. 263 de 20 de Septiembre de 1935 pag. 2232-2233.

[3] ABET. (2011). Criteria for accrediting engineering programs: Effective for review during the 2012–2013 accreditation cycle. http://www.abet.org

[4] Engineering Council. The accreditation of Higher Education Programmes UK. Standard for Professional EngineeringC ompetence.3ªed. http://www.engc.org.uk/engcdocuments/internet/Website/Accreditation%20of%20Higher%20Education%20Programmes%20third%20edition%20(1).pdf

[5] Boulton, G. (2011). University Rankings: Diversity, Excellence, and the European Initiative. Procedia Social and Behavioral Sciences, 13, 74-82. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.03.006

[6] FUNDACIÓN BBVA, ESENCIALES 2019 Esenciales, Nº 40. Octubre, 2019: Las posibilidades de inserción laboral de los universitarios pueden llegar a triplicarse según la titulación elegida. https://www.fbbva.es/esencial/

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean hacer constar el agradecimiento al Consejo General de Colegios de Ingenieros Industriales por promover y financiar el estudio, tratando de velar por la más estrecha relación entre el desempeño de los másteres y su calidad, con la profesión de Ingeniero Industrial, tan trascendente para el desarrollo de nuestro país.

Por otra parte, también a la Conferencia de Directores de las Escuelas de Industriales, que en todo momento ha colaborado y facilitado el estudio, haciéndolo posible.

Por último a la Fundación Caja de Ingenieros, por su patrocinio para llevar a cabo el estudio.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9560-1.pdf

Cod. 9083 | Tecnología de la construcción | 3305.33 Resistencia de estructuras

Análisis por elementos finitos del comportamiento estructural de fortificaciones españolas en los Estados Unidos aplicando la norma ASCE 7-10 y simulación de impactos y explosiones

Finite element analysis of the structural behaviour of Spanish fortifications in the United States applying the ASCE 7-10 standard and simulation of impacts and explosions

Manuel Cabello-De-Alba-Lara, Isabel Castillejo-González y Francisco De-Paula-Montes-Tubio
Universidad de Córdoba. Departamento Ingeniería Gráfica y Geomática (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9083

El objetivo de este artículo es el análisis de estructuras defensivas desarrolladas por Ingenieros Militares españoles durante los siglos XVII, XVIII y XIX en los actuales Estados Unidos. Durante 306 años, Ingenieros Militares españoles [1] desarrollaron todo tipo de construcciones, elaboración de mapas y planos; fortificaciones, iglesias, edificios civiles, etc.

Estos ingenieros fueron formados acorde un plan de estudios específico que se desarrolló principalmente en la Academia Militar de Matemáticas de Barcelona (1720) y que se creó para la formación académica del cuerpo de Ingenieros Militares fundado en 1711.

La uniformidad en la formación académica recibida por todos ellos hará que dichas construcciones presenten rasgos similares en Europa y en América. Sin embargo, podemos encontrar sistemas defensivos originales en algunas fortificaciones de los EEUU como el Fuerte de San Felipe y Fuerte Borbón en la desembocadura del Río Misisipi realizadas por el Ingeniero Militar Joaquín de Peramas.

Las fortificaciones defensivas más importantes se encuentran en Florida, Alabama y Luisiana. Este tipo de construcciones se ejecutaron con muros de fábrica y tenían como misión principal enfrentarse a ejércitos europeos (principalmente ingleses) con tecnología militar avanzada, así como a ataques de piratas y corsarios. El sistema defensivo en el resto de los territorios controlados por España (California, Nuevo México, Texas, Arizona, Colorado) tenía como objetivo defenderse de a ataques indios por lo que las construcciones eran más frágiles; adobe y/o madera.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante la aplicación de métodos finitos de cálculo de estructuras se ha analizado una sección del muro defensivo más representativo de las fortificaciones españolas en los EEUU.

Este tipo de fortificaciones de mampostería se encuentran principalmente en San Marcos de Apalache, Mobile, Pensacola y Nueva Orleans.

A diferencia de otras fortificaciones, el Castillo de San Marcos está construido de un tipo de roca sedimentaria llamada coquina. La coquina es una roca sedimentaria perteneciente a las rocas calizas, compuesta de agregados no consolidados, pobremente cementados, de conchas, esqueletos de corales que han sido fracturados mecánicamente por procesos naturales. Sus propiedades mecánicas; (Módulo de Young, densidad, resistencia a la tracción y compresión) son inferiores a otro tipo de rocas sedimentarias [2-4]. Por lo tanto, un análisis detallado de las tensiones a compresión y tracción del muro nos permitirá analizar las zonas menos resistentes y los riesgos de rotura.

Por esta razón se ha analizado el muro defensivo exterior de esta fortificación al ser el caso más desfavorable de las fortificaciones estudiadas. El resto de las fortificaciones en EEUU presentará unas tensiones y deformaciones menores que las sufridas por el Castillo de San Marcos. Se ha analizado una sección de 10 m del muro defensivo [5] exterior del Castillo de San Marcos en San Agustín.

La construcción del Castillo de San Marcos se inició en 1672 y fue completada en 1695. Sufrió continuas mejoras y modificaciones como la del Ingeniero Pedro Ruiz de Olano en 1738. En 1702 fue bombardeado durante 27 días sin ser destruido. Es el fuerte de mampostería más antiguo de los EEUU continentales.

Se ha seleccionado el programa ABAQUS [6] para modelizar el comportamiento de una sección del muro exterior frente a diferentes solicitaciones. Se considera el muro como un sólido homogéneo con las mismas propiedades mecánicas.

La modelización del muro requiere de las siguientes etapas:

- Dimensionado del muro
- Introducción de propiedades mecánicas
- Modelización del muro exterior de la fortificación
- Condiciones de contorno
- Creación de mallas y nodos
- Aplicación de cargas sobre dicho muro
- Análisis

Visualización y obtención de Resultados. Para este estudio de han seleccionado los siguientes resultados:

- Tensión máxima principal
- Desplazamientos.

2.1. COMBINACIÓN DE ACCIONES

Se ha analizado y simulado el muro defensivo con la actual normativa ASCE 7-10. También se ha analizado la fuerza de oleaje aplicando la normativa Flood Resistant Design and Construction. ASCE Standard ASCE 24-05.

- Combinación de acciones ASCE 7-10:
- Combinación 1 $1.4D$
- Combinación 2 $1.2D + 1.6L + 0.5$ (L_r or S or R)

- Combinación 3 1.2+1.6(L_r or S or R)+(L or 0.5W)
- Combinación 4 1.2D+1.0W+L+0.5 (L_r or S or R)
- Combinación 5 1.2D+1.0E+L+0.2S
- Combinación 6 0.9D+1.0W
- Combinación 7 0.9D+1.0E

Donde:
- D= Peso propio
- L= Sobrecarga de uso
- L_r= Sobrecarga de uso en cubierta
- R= Carga debida a la lluvia
- S= Carga debida a la nieve
- W= Carga debida al viento
- E= Carga sísmica

Se han despreciado las acciones debidas a la nieve y las sobrecargas de uso. Se han analizado con especial detalle las acciones sísmicas y viento al encontrarse San Agustín en zona de huracanes.

Se han implementado en ABAQUS las acciones más desfavorables; Combinación 1, 4 y 5.

2.1.1. Cargas Sísmicas

Coeficiente de respuesta sísmica, c_s

$$c_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (1)$$

Donde:
S_{DS}: Diseño de parámetros de aceleración de respuesta espectral para cortos periodos de tiempo
S_{D1}: Diseño de parámetros de aceleración de respuesta espectral para un periodo de 1 segundo
R: Factor de modificación de respuesta
I_e: Factor de importancia

$$cs = 0.0044 \cdot SDS \cdot Ie > 0.01 \quad (2)$$

$$\frac{S_{D1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3)$$

Periodo fundamental de la estructura, T_a, definido como [4].

$$T_a = C_t h_n^{\,x} \quad (4)$$

Donde:
h_n: altura del edificio por encima de la base en metros
c_t: coeficiente de periodo del edificio.
x: constante dada en la tabla Table 12.8-2, ASCE 7-10
c_u: coeficiente del periodo superior calculado; 1,6

$$C_u T_a \quad (5)$$

Esfuerzo cortante sísmico base, V

$$V = C_s W, \text{ Tm} \quad (6)$$

Donde:
W: peso sísmico efectivo (Tm). Deberá incluir el peso propio
por encima de la base.
Factor de distribución vertical, C_{vx}

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^{\,k}}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i^{\,k}}, \text{ KN} \quad (7)$$

Donde:
k: exponente de distribución relativa al periodo del edificio
Fuerzas laterales al nivel x

$$F_x = C_{vx} V, \text{ KN} \quad (8)$$
$$F_x = 114 \text{ KN}$$

Combinación de Acciones	Peso Propio	Viento	Carga Sísmica
Combinación 1	1.4·5382 KN		
Combinación 4	1.2·5382 KN	1·3,8 KN/m²	
Combinación 5	1.2·5382 KN		1·114 KN

Tabla 1: Combinación de acciones

Bola de cañón	AE (m)	AM (m)	Masa (Kg)	v(m/s)	a(m/s²), t=0.1s	Fuerza de Impacto (N)
36 libras	1000	3700	17.6	450	4500	79200
24 libras	>1000	3300	11.7	450	4500	52650
18 libras	>1000	3100	8.8	450	4500	39600
12 libras	>1000	3000	5.43	450	4500	24435
8 libras	>1000	3000	3.91	450	4500	17595

AE: alcance efectivo
AM: alcance máximo

Tabla 2: Fuerza de Impacto horizontal para distintas bolas de cañones [10 - 11]. Elaboración propia

2.1.2. Cargas de Viento

Cargas de Viento:
Factor topográfico, K_{zt}, definido como

$$K_{zt} = (1 + k_1 k_2 k_3)^2 \quad (9)$$

Donde:
k_1: coeficiente de carga de viento ASCE 7-10
k_2: coeficiente de carga de viento ASCE 7-10
k_3: coeficiente de carga de viento ASCE 7-10 Presión debida a la velocidad calculada a la altura Z

$$q = 0.613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2, \text{ N/m}^2 \quad (10)$$

Donde:
k_d: factor de direccionalidad del viento V: velocidad básica del viento, m/s Presión de viento, p, definido como

$$p = q_z \cdot G \cdot c_p - q_i (G \cdot C_{pi}), \text{ N/m}^2 \quad (11)$$

Donde:
G: factor de ráfaga
c_p: coeficiente de presión del muro
$p = 3{,}8 \text{ KN/m}^2$

2.2. FUERZA DE OLEAJE DE ROTURA NETA

Fuerza de oleaje de rotura neta por unidad lineal de estructura, F_t,

$$F_t = 1.1 c_p \gamma_W d_s^{\,2} + 2.4 \gamma_W d_s^{\,2}, \text{ KN/m}^2 \quad (12)$$

Donde:
c_p: coeficiente de presión dinámica ($1.6 < c_p < 3.5$). Tabla 5.4.1, ASCE 7-10; 0.8
γ : 10.05 KN/m³ densidad del agua salada
d_s: profundidad del agua en metros en la base del edificio donde las olas impactan con la estructura

Fuerza de oleaje de rotura neta por unidad lineal de estructura, F_{nv}

$$F_{nv} = F_t \sin^2 \alpha \quad (13)$$

Donde:
α: Angulo horizontal entre la dirección de la ola y la superficie vertical
$F_{nv} = 448 \text{ KN/m}$

2.3. SIMULACIÓN DEL EFECTO EXPLOSIVO EN LA CARA INTERIOR DEL MURO

Para el cálculo de las cargas explosivas se han aplicado las ecuaciones de Newmark-Hansen y Mills [7]. En ambas ecuaciones el TNT (Trinitrotolueno) es una

referencia universal para determinar el factor escalado de distancia, Z. El primer paso para cuantificar la onda explosiva de un material explosivo diferente de TNT es convertir la masa en su equivalente en TNT.

El tiempo considerado para la explosión se ha establecido en 0,1 segundos [8].

2.3.1. Ecuación de Newmark and Hansen

Sobrepresión estática máxima del frente de onda, p_S,

$$p_s = 6784 \cdot \frac{W}{R^3} + 93 \cdot \sqrt{\frac{W}{R^3}} \quad , \text{KPa} \quad (14)$$

Donde:
R: distancia desde el centro en metros.
W: masa de carga en Kilogramos de TNT

2.3.2. Ecuación de Mills

Sobrepresión estática máxima del frente de onda, p_S,

$$p_s = \frac{1772}{Z^3} + \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} - 0.019, \text{KPa} \quad (15)$$

Distancia escalada, Z.

$$z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (16)$$

Donde:
R: distancia desde el centro en metros
W: masa de carga en Kilogramos de TNT
158 kg de pólvora=95 kg TNT

2.4. FUERZAS DE IMPACTO

Para la determinación de este valor de la fuerza aplicada se utiliza el teorema del impulso mecánico:

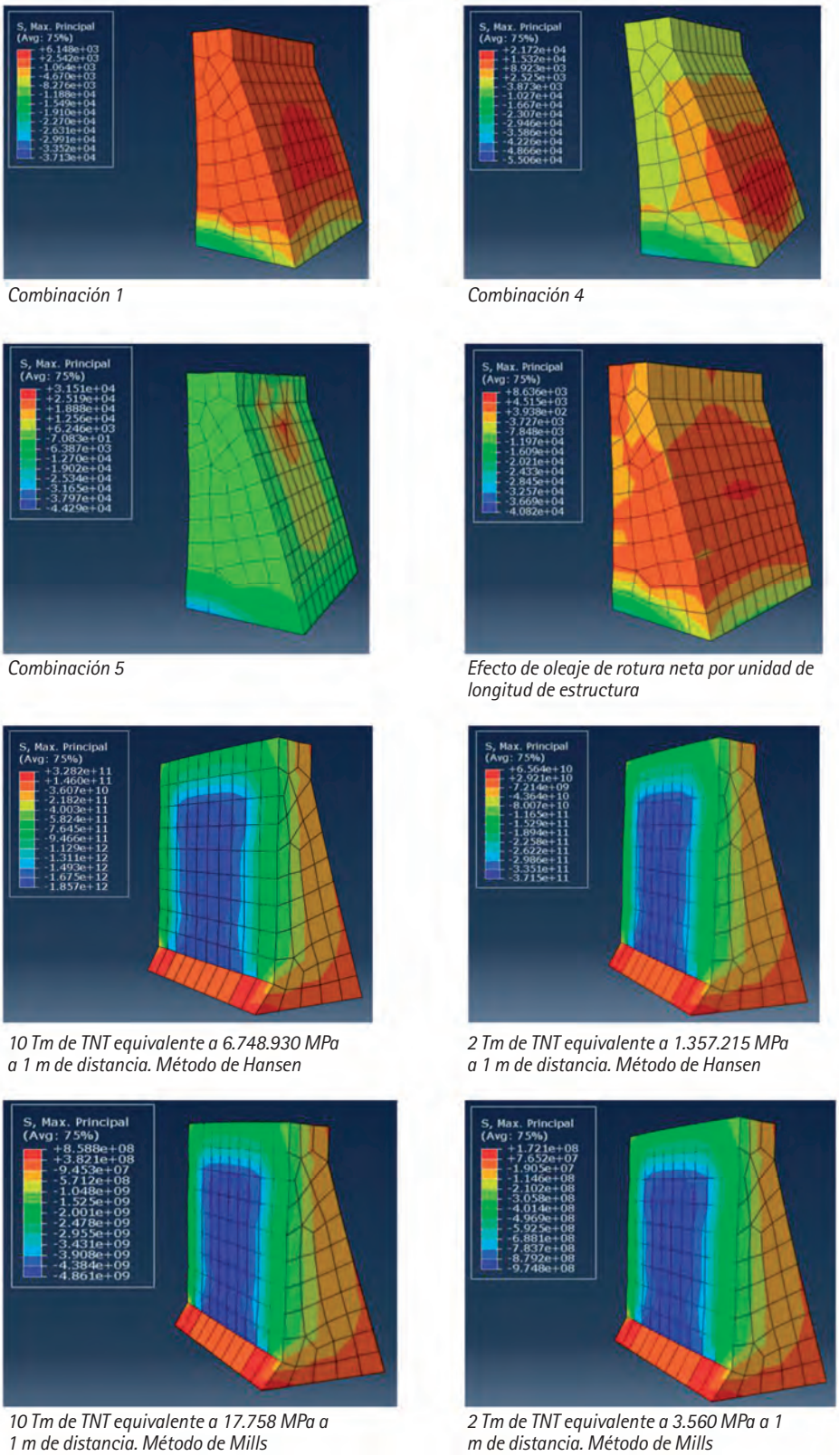
$$m_v \cdot v = \int_{F=0}^{t=\tau} f(t) \cdot dt = F \cdot \tau \quad (17)$$

Donde
m_v: Masa del objeto que impacta
v: Velocidad del impacto
$f(t)$: Fuerza variable en función del tiempo
F: Fuerza máxima alcanzada Despejando F se obtiene

$$F = \frac{m_v \cdot v}{\tau} \quad (18)$$

F: Fuerza de impacto (N)
m: masa bola de cañón (Kg)
τ: Tiempo de duración del impacto [9]

Se ha analizado el comportamiento de los muros frente al impacto de bola de cañón de mayor impacto del siglo XVIII (36 libras) y frente a impactos de mayor cuantía.



Combinación 1 | *Combinación 4*

Combinación 5 | *Efecto de oleaje de rotura neta por unidad de longitud de estructura*

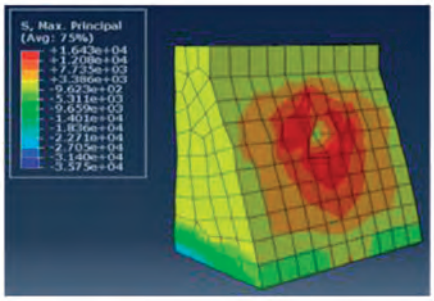
10 Tm de TNT equivalente a 6.748.930 MPa a 1 m de distancia. Método de Hansen | *2 Tm de TNT equivalente a 1.357.215 MPa a 1 m de distancia. Método de Hansen*

10 Tm de TNT equivalente a 17.758 MPa a 1 m de distancia. Método de Mills | *2 Tm de TNT equivalente a 3.560 MPa a 1 m de distancia. Método de Mills*

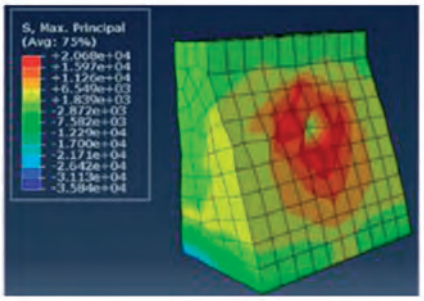
Figura 1: Tensiones máximas principales en muro exterior aplicando normativa americana ASCE 7-10 y ASCE 24-05 para las combinaciones más desfavorables, tipo I, 4, 5, el efecto de oleaje de rotura neta por unidad de longitud de estructura a 3 metros de altura y simulación de explosiones en la cara interior del muro exterior para diferentes cantidades de explosivo equivalente a TNT a 1 m de distancia

2.5. SIMULACIÓN DEL EFECTO EXPLOSIVO EN POLVORINES DE MAMPOSTERÍA CON FORMA DE BOVEDA

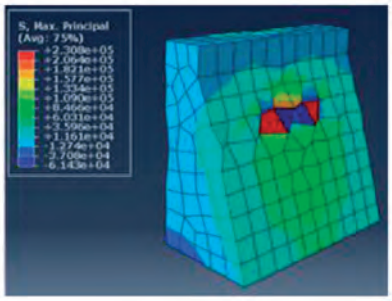
Para el cálculo del comportamiento de la bóveda de mampostería se ha simulado la existente en el Castillo de San Marcos que tiene las siguientes dimensiones; el eje horizontal de la bóveda de cañón es de 4 m y el eje vertical 3 m; el espesor del muro de fábrica es de 35 cm.



Fuerza de impacto de bola de cañón de 36 libras (79,2 KN)

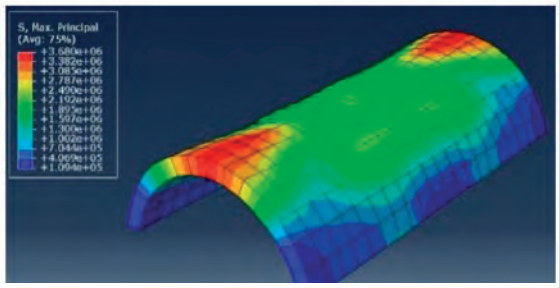


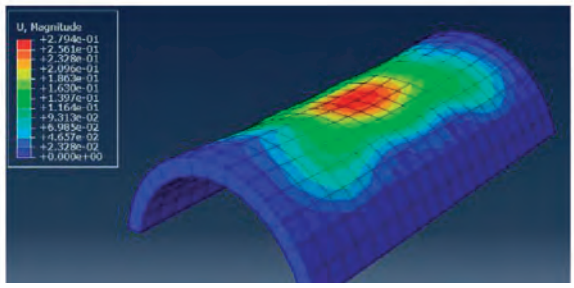
Fuerza de impacto de bola de cañón equivalente a 100 KN



Fuerza de impacto de bola de cañón equivalente a 500 KN

Figura 2: Simulación del impacto en el muro de diferentes fuerzas de impacto; desde 79,2 KN a 4000 KN





Efecto explosivo de 5 Kg de TNT equivalente a 1,28 MPa a 2 m de distancia del muro

Figura 3: Simulación del efecto explosivo de diferentes cantidades equivalentes de TNT a dos metros de distancia del muro en polvorín de mampostería con forma de bóveda. Tensión Max. Principal y deformación Aplicación de la ecuación de Mills

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de todas las simulaciones realizadas tanto en el muro como en el almacén de pólvora. Se han analizado las tensiones máximas principales a tracción y compresión para determinar si hay riesgo de rotura.

Las tensiones admisibles a tracción y compresión se encuentran dentro del intervalo admisible para las tres combinaciones de acciones seleccionadas: 1, 4 y

Intervalo admisible ($-5.6\cdot10^6$, $1.96\cdot10^5$) (N/m2)	Valor Mínimo (N/m^2)	Valor Máximo (N/m^2)	Comentario
COMBINACIÓN DE ACCIONES			
Combinación 1	$-3.71\cdot10^4$	$6.14\cdot10^3$	
Combinación 4	$-5.50\cdot10^4$	$2.17\cdot10^4$	
Combinación 5	$-4.42\cdot10^4$	$3.15\cdot10^4$	
Fuerza de Oleaje de Rotura Neta	$-4.08\cdot10^4$	$8.60\cdot10^3$	
SIMULACIÓN DE EXPLOSIONES EN LA CARA INTERIOR DEL MURO			
10 Tm de TNT. Ecuación de Hansen	$-1.85\cdot10^{12}$	$3.20\cdot10^{11}$	Tensiones de tracción y compresión superiores a las admisibles
2 Tm de TNT. Ecuación de Hansen	$-3.71\cdot10^{11}$	$6.56\cdot10^{10}$	Tensiones de tracción y compresión superiores a las admisibles
10 Tm de TNT. Ecuación de Mills	$-4.86\cdot10^9$	$8.58\cdot10^8$	Tensiones de tracción y compresión superiores a las admisibles
2 Tm de TNT. Ecuación de Mills	$-9.74\cdot10^8$	$1.72\cdot10^8$	Tensiones de tracción y compresión superiores a las admisibles
SIMULACIÓN DE IMPACTO			
Fuerza de Impacto 79,2 KN	$-3.57\cdot10^4$	$1.64\cdot10^4$	
Fuerza de Impacto 100 KN	$-3.58\cdot10^4$	$2.06\cdot10^4$	
Fuerza de Impacto 500 KN	$-6.14\cdot10^4$	$2.30\cdot10^5$	Tensiones de tracción superiores a las admisibles
Fuerza de Impacto 1000 KN	$-1.22\cdot10^5$	$4.64\cdot10^5$	Tensiones de tracción superiores a las admisibles
Fuerza de Impacto 2000 KN	$-2.42\cdot10^5$	$9.32\cdot10^5$	Tensiones de tracción superiores a las admisibles
Fuerza de Impacto 4000 KN	$-4.81\cdot10^5$	$1.86\cdot10^6$	Tensiones de tracción superiores a las admisibles
SIMULACIÓN DE EXPLOSIONES EN ALMACEN DE PÓLVORA			
5 Kg TNT. Ecuación de Mills	$1.09\cdot10^5$	$3.68\cdot10^6$	Tensiones de tracción superiores a las admisibles
10 Kg TNT. Ecuación de Mills	$-5.19\cdot10^5$	$1.49\cdot10^7$	Tensiones de tracción superiores a las admisibles
20 Kg de TNT. Ecuación de Mills	$-2.12\cdot10^5$	$2.46\cdot10^7$	Tensiones de tracción superiores a las admisibles

Tabla 3: Valores máximos y mínimos de las tensiones a tracción y compresión para cada simulación

5 (Tabla 3 y Fig. 1). La estructura no presenta ningún riesgo de fisuración o rotura.

La explosión de 2 y 10 Tm equivalentes de TNT para las ecuaciones de Newmark-Hansen y Mills (Tabla 3 y Fig. 1) en la cara interior del muro rebasan los límites de tensiones admisibles a tracción y compresión en el muro. Por lo que es de prever el colapso de la estructura en la zona de la explosión.

No se aprecia para la fuerza de impacto de 79,2 KN (bolas de cañón de 36 libras) ningún problema estructural. (Tabla 3 y Fig. 2). Tampoco se aprecia para la fuerza de impacto de 100 KN.

A partir de 500 KN, cuando la fuerza se ha multiplicado por 6 se producen tensiones de tracción superiores a la admisible en la zona del impacto. Por lo que la estructura sufriría algún grado de destrucción en la zona afectada.

Este impacto de 500 KN equivaldría a una bola de cañón de 111 kg de peso; una masa muy superior para una bola de cañón de la época.

Se han analizado en detalle las tensiones alrededor de la zona de impacto (ver material suplementario) desde 79,5 KN a 4.000 KN. Para todos los impactos analizados la máxima tensión de compresión se alcanza en el nodo 406 y la máxima tensión de tracción en el nodo 237.

Para la carga explosiva de 5, 10 y 20 Kg equivalentes de TNT en el polvorín (Tabla 3 y Fig. 3) se producen tracciones superiores a la tensión admisible por lo que la estructura podría sufrir algún grado de destrucción total o parcial. No obstante, el objetivo del confinamiento de la pólvora es el de atenuar los efectos de la explosión y minimizar la destrucción de zonas colindantes o la pérdida de vidas humanas. Por lo tanto, aunque la estructura colapsase, amortiguaría dicha explosión. En algunos casos, los polvorines se rellenan con materiales ligeros con lo que disminuiría el efecto explosivo. No se tienen datos del relleno del material en el Castillo de San Marcos por lo cual no se puede realizar una simulación en detalle. No obstante, se ha realizado la simulación (Ver material suplementario) considerando las mismas propiedades del relleno a efectos de obtener un orden de magnitud de dicho amortiguamiento.

4. DISCUSIÓN

Sobre la aplicación del modelo propuesto:

El análisis mediante elementos finitos de estructuras de muros de mampostería, en este caso aplicado a una sección del muro exterior de fortificaciones militares, permite conocer las tensiones a atracción y compresión en cualquier zona del muro y las áreas más vulnerables a sufrir una rotura. En nuestro caso, las combinaciones de acciones aplicando la normativa ASCE 7-10 y ASCE 24-05 no producen ningún riesgo estructural. No obstante, este modelo de cálculo puede aplicarse a otro tipo de construcciones existentes que pueden ser interesantes desde un punto de vista de conservación de otros edificios españoles similares construidos en los EEUU o a edificios en ruinas o no existentes pero que pueden reconstruirse virtualmente en 3D.

Sobre el estudio estructural de la fortificación:

- Las fortificaciones diseñadas por los ingenieros militares españoles en los siglos XVII, XVIII y XIX estaban preparadas para resistir las acciones derivadas de riesgos meteorológicos (huracanes) y geológicos (seísmos). Dichas construcciones cumplirían hoy con la normativa americana ASCE 7-10 y ASCE 24-05. El material constructivo del Castillo de San Marcos presenta unas propiedades mecánicas menos resistentes que otro tipo de rocas sedimentarias que pudieran encontrarse en otras fortificaciones en Nueva Orleans, Pensacola o San Marcos de Apalache. Por lo tanto, su resistencia a tracción y compresión para similares simulaciones será mayor que la obtenida en Castillo de San Marcos y presentarían menos riesgos a sufrir daños.
- Dichas fortificaciones podrían resistir el impacto de artillería del siglo XVIII sin sufrir riesgos estructurales.
- Las cargas equivalentes de 2 TNT estudiadas provocarían la destrucción del muro.
- La resistencia estructural de la bóveda del almacén de pólvora se ve comprometida para cargas de 2 Kg equivalentes de TNT.

REFERENCIAS

- Capel, H., García, L.; Moncada, O.; Olivé, F.; Rodriguez, A.; Sánchez, J-E; Tello, R.: Los Ingenieros Militares en España; siglo XVIII. Repertorio biográfico e inventario de su labor científica y espacial. Universidad de Barcelona. Colección Geo-Crítica Textos de apoyo, 1983.
- Knab, I; Clifton, R. Mechanical and physical properties of coquina stone from the Castillo de San Marcos National Monument. Center for Building Technology. Gaithersburg, MD, 1988.
- Sanika, G; Jannotti, P; Subhash, G. The Impact Response of Coquina: Unlocking the Mystery Behind the Endurance of the Oldest Fort in the United States. Society for Experimental Mechanics, 2015.
- Stokmo, S. Experimental Study of Direct Tensile Strength in Sedimentary Rocks. Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- Fort Marion and Fort Matanzas National Monuments, Washington, United States Department of the Interior. National Park Service, 1941.
- Roman, N. Guía de Modelado con el Software Abaqus. Grupo de Investigación de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Tecnológica Nacional, 2013.
- Draganic, A; Sigmud, V. Blast loading in structures. Faculty Civil Engineering. Researchgate. Croacia, 2012.
- Dallriva, F. Blast Load Simulation Experiments for Computational Model Validation. US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center, 2016.
- Ferrer, B. Tesis Doctoral: Estudio del comportamiento de pilares de edificación frente a cargas de impacto. Universidad de Alicante, 2011.
- Boudriot, J. L'Artillerie de mer: marine française 1650-1850. ANCRE. Paris, 1992
- Peter, J. L'artillerie et les fonderies de la marine sous Louis XIV. Paris, 1995.

La sostenibilidad energética: indicadores macroeconómicos y sectores productivos

Energy sustainability: macroeconomic indicators and productive sectors

Alberto Martínez-Sentana, Sergio Valero-Verdú y Carolina Senabre-Blanes
Universidad Miguel-Hernandez (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9183

Como punto de partida, el planteamiento de estrategias energéticas sostenibles se debe acometer partiendo de una serie de fundamentos. La seguridad y calidad de suministro es un concepto básico para satisfacer la demanda de energía, ésta a su vez dotada de un dinamismo creciente al ritmo de la evolución tecnológica. Por otro lado respetando el medioambiente y la biodiversidad ante el impacto que produce el uso de la energía en cualquiera de sus formas. El impulso de la economía sostenible, teniendo en cuenta la eficiencia en los procesos, en las organizaciones y en las personas, así como la responsabilidad social de los sectores productivos, como generadores de empleo. Por último, hay que garantizar la equidad social en todas sus formas, con un acceso universal a la energía a costes razonables, dinamizando a la vez los mercados energéticos, haciéndolos más eficientes y competitivos.

El problema radica principalmente en la determinación de las variables que deben monitorizarse, pero primero se ha de cuestionar su idoneidad a las diferentes coyunturas económicas, energéticas, territoriales y sociales de los diferentes territorios, es decir, no todas las variables serán las más idóneas para realizar un análisis de la situación energética en las distintas naciones teniendo en cuenta el concepto de sostenibilidad local [1]. Por tanto, ya no debemos hablar tanto de variables de sostenibilidad energética, sino de familias de variables de sostenibilidad que serán adecuadas a diferentes coyunturas de las naciones.

El modelo se desarrolla en base a tres grandes ámbitos de decisión: medioambiente (emisiones y contaminación), economía (crecimiento) y sociedad (demanda de energía), que al descender en el análisis al subsector de la sostenibilidad energética, adquieren mucha importancia dos aspectos básicos de energía: la seguridad de suministro y la regulación de los mercados. En base a estos cinco grandes ámbitos se construye un modelo de indicadores para monitorizar el cumplimiento de la sostenibilidad energética en las diferentes naciones. No obstante, se establecen diferentes umbrales que determinarán el grado de cumplimiento de los países, y se establecerán ratios de variables energéticas y de competitividad y productividad específicas.

Existen otros modelos de indicadores, planteados por diferentes organizaciones para la monitorización de datos a nivel internacional [2] y [3]. Muchos de ellos son complementarios y sirven de gran ayuda para la toma de decisiones en materia de energía. Los más cercanos al componente energético que nos ocupa son los siguientes: modelo del World Energy Council (WEC - Trilema Energético), el modelo de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA - modelo EISD – Energy Indicators for Sustainable Development), el modelo de la International Energy Agency (IEA – OCDE) y, por último, un modelo más alejado del vector energético, pero interesante por el tratamiento que realiza sobre el concepto de la sostenibilidad: los Objetivos del Desarrollo del Sostenible (ODS – Naciones Unidas).

1. PREMISAS PARA UN MODELO DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Se debe partir de tres premisas fundamentales. La primera premisa radica en la utilización del paradigma de la sostenibilidad débil [4], como el único posible a través del cual desarrollar una conceptualización que tenga en cuenta la fuerza transversal de la tecnología [5], que permita ampliar los límites del capital natural y hacerlo ilimitado al tiempo que sustituible, aspecto éste último que, mediante el paradigma fuerte del desarrollo sostenible no es posible razonarlo ya que plantea un capital natural efímero y limitado. Por

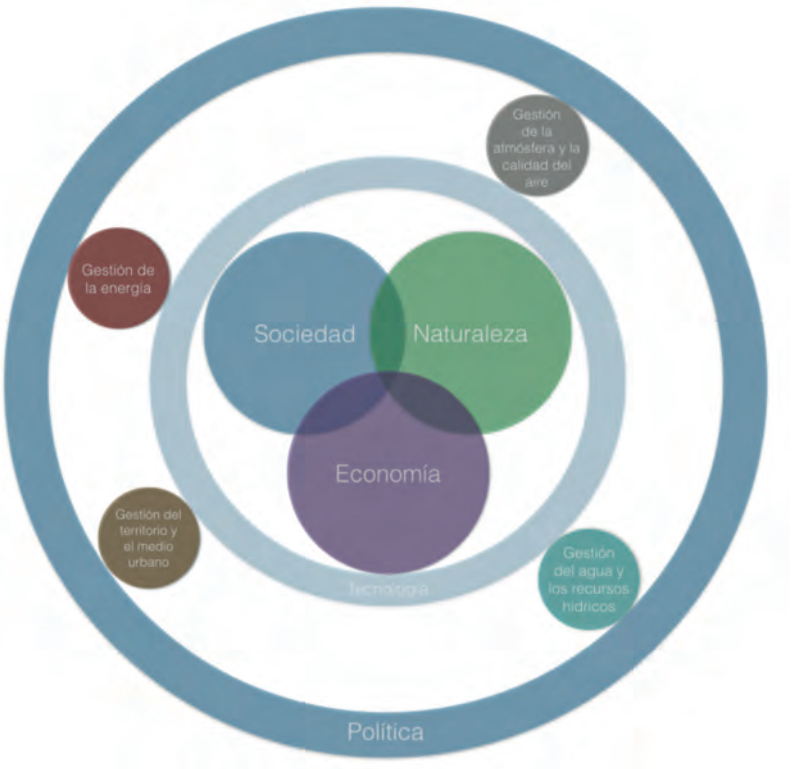


Figura 1: Contextualización de la sostenibilidad energética

tanto también la disociación entre las tres dimensiones del desarrollo sostenible sólo podría concebirse mediante el paradigma de la sostenibilidad débil en la conceptualización del desarrollo sostenible.

La segunda premisa se establece en que la sostenibilidad energética subyace al desarrollo sostenible, es decir, la sostenibilidad energética se encuentra en una capa diferente a la definida por las tres dimensiones del desarrollo sostenible: economía, naturaleza y sociedad. No existirá desarrollo sostenible sin una sostenibilidad energética que permita dicho desarrollo (coexistente también con los subsistemas: gestión del territorio, gestión atmosférica y calidad del aire, gestión del agua y los recursos hídricos), [6]. Por tanto, para que exista desarrollo sostenible, también debe existir esa sostenibilidad en los cuatro subsistemas alrededor de las tres dimensiones (Figura 1).

La tercera premisa consiste en la idoneidad de los indicadores a las diferentes coyunturas económicas, energéticas, territoriales y sociales de los diferentes territorios es decir, no todos los indicadores serán los más idóneos para realizar un análisis de la situación energética en las distintas naciones, teniendo en cuenta el concepto de sostenibilidad local [1], ya que se pueden llegar a obtener conclusiones y definir políticas que no serán replicables.

Los indicadores aquí definidos se adecúan por tanto a una determinada coyuntura energética, territorial, social y económica. Satisfacer la evaluación, por ejemplo, de espacios vulnerables, zonas rurales en países desarrollados, o áreas industriales y su impacto en la biodiversidad, debería definirse a través de nuevos indicadores, quizá enfocados a variables más operativas como consumo de biomasa, grado de despoblación o incluso índices de deforestación, aspecto que sobrepasa los objetivos de este artículo.

2. ESTRUCTURA DE LA GOBERNANZA PARA LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Por tanto, si trasladamos el análisis de las tres dimensiones del desarrollo sostenible hacia sus descriptores homólogos en el plano de la sostenibilidad energética aparecen tres grandes ámbitos donde enmarcar los indicadores: emisiones y contaminación (medioambiente), crecimiento (economía) y demanda de energía (sociedad), y que como al final del artículo se explicará, servirán para la validación del modelo a través de la disociación de variables pertenecientes a estas tres grandes dimensiones. Por otro lado, descendiendo en el análisis al subsector de la sostenibilidad energética, aparecen y adquieren mucha importancia: la seguridad de suministro y la regulación y los mercados.

Como se puede observar en la Figura 2, se debe tener en consideración dos nuevos ámbitos en la toma de decisiones para la gobernanza: por un lado el concepto de seguridad de suministro, de importancia estratégica para el sector de la energía y del que parten grandes áreas como el transito de energía, la logística de aprovisionamiento, la gestión técnica de las redes e infraestructuras, los parámetros de calidad establecidos para cada una de las diferentes formas de energía, y lo que es más importante, como indicador y preocupación fundamental de las políticas energéticas de muchos países europeos: el **Grado de Autoabastecimiento o la Dependencia Energética Exterior**, que será la principal variable a considerar en el modelo.

Por otro lado, respecto a la regulación de los mercados, adquiere mucha relevancia los instrumentos de gestión sostenible de la energía: desde el nivel mayorista con la estructura de formación de precios desde la oferta, hasta el minorista con la regulación de la tarifa de acceso o las fórmulas de gestión de la demanda en los diferentes sectores intensivos en consumo de energía (transporte, industria, comercio, servicios, edificación,...). Si bien es cierto que existen todavía muchos interrogantes en la manera que afectará la gestión de la información en el comportamiento de los mercados y los nuevos escenarios regulatorios (autoconsumo),

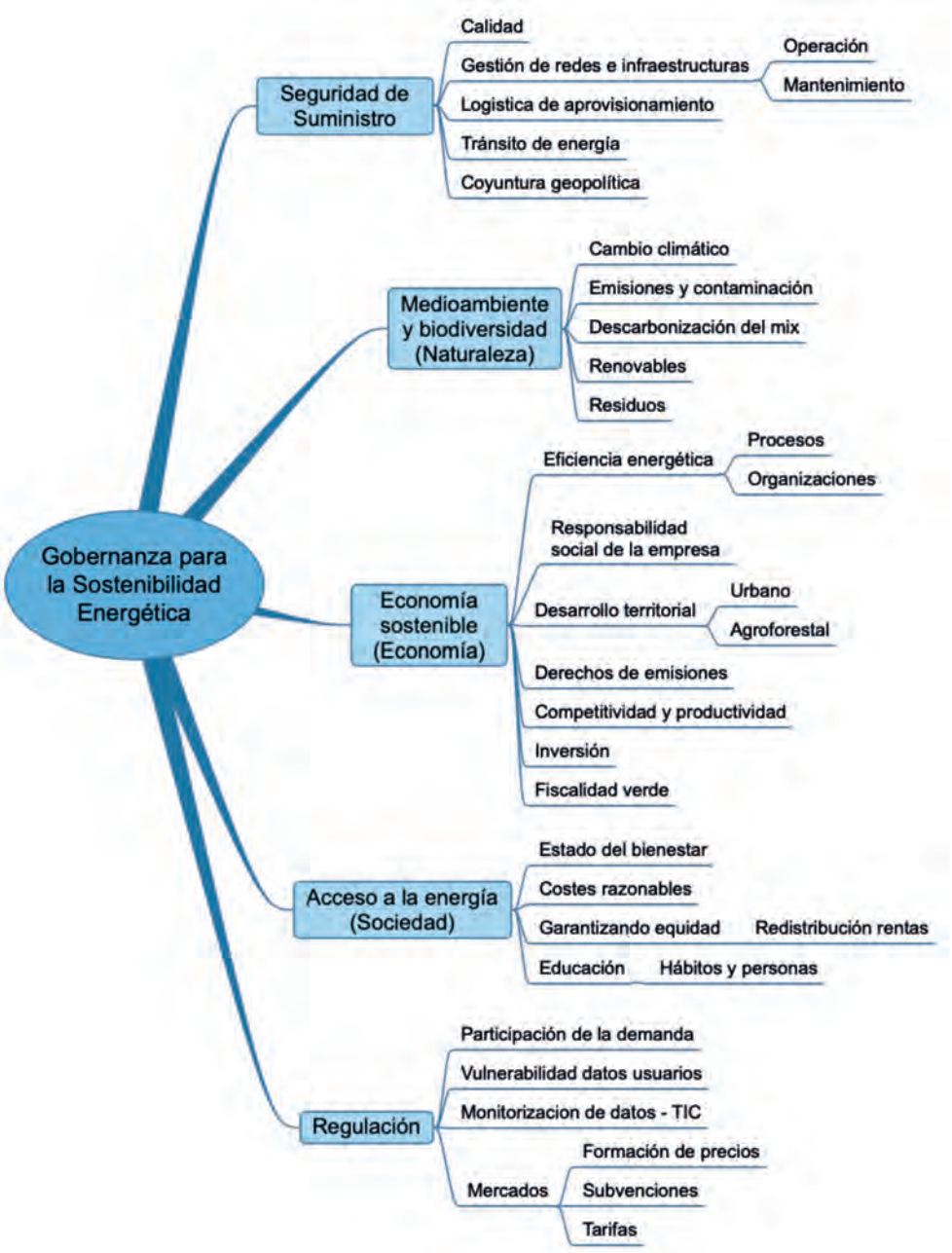


Figura 2: Estructura de gobernanza para la sostenibilidad energética

sin lugar a dudas será el sector eléctrico el que podrá beneficiarse de una gran dinamización con una buena gestión de las tecnologías existentes que puede llevar hacia un nuevo paradigma. Por tanto como indicador fundamental de agregación se define la **Intensidad Técnica del sistema energético**.

Como tercer gran ámbito dentro de la gobernanza para la sostenibilidad energética se define la protección del medioambiente y el clima en todas sus facetas, que agrega todas aquellas acciones que deben hacer sostenible nuestra biodiversidad: supervisando las consecuencias del cambio climático, potenciando la reducción de las emisiones y la contaminación, impulsando la descarbonización del mix, desarrollando las energías provenientes de fuentes renovables, definiendo nuevas políticas de reciclado de residuos, e implantando y desarrollando instrumentos de gestión ambiental como la Huella Ecológica. Por ello debe existir un indicador agregado, que en este caso se tendrá en cuenta por su diversificación y por su reconocimiento internacional: **Intensidad de Emisiones de CO_2**.

Respecto al cuarto gran ámbito, la economía sostenible, recoge las acciones de impulso a la inversión, política territorial e hídrica, políticas de eficiencia, fiscalidad, financiera y de mejora de la competitividad de las empresas que permitan un marco estable para promover inversiones, sobretodo, desde el sector privado. Pero exigen también esfuerzos en materia de desarrollo de productos y servicios que tenga en cuenta el ciclo de vida completo desde la concepción y el diseño hasta la desaparición, requiriendo de una cultura de la eficiencia a todos los niveles. Para monitorizar este importante ámbito, el parámetro que determinará la desagregación en el paradigma energético será la **Intensidad Energética de la Economía**.

Respecto al quinto gran ámbito, el de la sociedad y el acceso en equidad a la energía, es el núcleo del desarrollo sostenible ya que sin un acceso a la energía no puede existir progreso humano y mucho menos si se produce en condiciones de insostenibilidad. Es importante recordar que existen grandes contrastes en el mundo en relación con el acceso a la energía. Por último, destacar la iniciativa de Naciones Unidas sobre los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible [2], entre el que se encuentra el de garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Entre otros, como indicador principal sobre el que establecer la desagregación resultará muy acertado determinar el Índice de Progreso Social corregido por el Indice de Desarrollo Humano (IDH), como representante de este ámbito.

3. SELECCIÓN DE PAÍSES ANALIZADOS. CONSIDERACIONES PREVIAS EN LOS INDICADORES

Una variable interpretada de manera aislada pueden inducir a error, por ejemplo, respecto a la Intensidad Energética de la Economía, países como Nigeria, Kazakstán o Zambia tienen los índices más elevados del mundo, pero en otros ámbitos (derechos humanos, empleo, desarrollo tecnológico, estado del bienestar) se encuentran muy por detrás de otros países desarrollados con índices de intensidad energética mucho menores [1]. También es importante observar los indicadores en términos relativos: consumo energético per cápita, intensidad energética de la economía, intensidad de emisiones, PIB per cápita, etc..., que resultarán muy adecuados para realizar comparaciones entre naciones.

Además, ante la existencia además de aspectos geopolíticos muy diferenciados en otros continentes como la existencia de muy diferentes grados de compromisos medioambientales o el diferente nivel de protección de los derechos humanos, se debe enmarcar el análisis en un continente concreto de referencia.

Finalmente, se tendrá en cuenta también la perspectiva de coyuntura territorial: el modelo de transporte y movilidad, aspectos poblacionales (superficie de vivienda per cápita, sector residencial y terciario), distribución de PIB, y aspectos relacionados con el nivel de uso de la tecnología, que permitirá establecer también similitudes aplicando el concepto de sostenibilidad local, que facilitarán la comparativa de indicadores y obtener patrones de comportamiento según las siguientes variables.

- Población,
- PIB y PIB per cápita,
- Contribución de los sectores productivos al PIB,
- Actividad de transporte: modelo de transporte, distancia recorrida per cápita,
- Superficie de vivienda per cápita,
- Valor añadido bruto manufacturas u otros sectores económicos.
- Acceso a la electricidad y al agua por parte de la población (%),
- Asequibilidad de la energía (US$/kWh)
- Desigualdad en salarios o nivel de pobreza
- Coberturas sanitaria, educacional y de servicios sociales
- Estado de las infraestructuras y comunicaciones
- Coyuntura en materia de defensa y derechos humanos
- Intensidad energética de la economía (ktep/US$)
- Intensidad de emisiones (kCO2/US$) emisiones per cápita (kCO2/per capita)

Por tanto, los países comparables serán aquellos que tengan sus parámetros de coyuntura enmarcados en agrupaciones en función de las variables anteriores. El rango de naciones definidos para el estudio y en base a esos parámetros son: Alemania, Francia, Italia, Reino Unido y España.

4. DEFINICIÓN DE INDICADORES. ÍNDICE GENERAL DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

En los apartados anteriores se ha realizado una descripción general de todas las variables que enmarcan un conjunto de indicadores que representan la sostenibilidad energética desde las dimensiones del desarrollo sostenible. En este apartado se establece la formulación del Índice General de la Sostenibilidad Energética [6].

La expresión matemática que define el Índice General de Sostenibilidad Energética y que agrega todos los indicadores generales una vez normalizados es la siguiente:

$$IGSE_t^i = \frac{IEE_t^i}{140} + DEE_{UE_t}{}^i + \left(100 - IT_{SE_t}{}^i\right) + \frac{GEI_{PIBt}^i}{0{,}4} + \left(100 - IPS_{C_t}{}^i\right) \quad (1)$$

Donde:

$IGSE_t^i$, Índice General de Sostenibilidad Energética

IEE_t^i, Intensidad Energética de la Economía (ktep/€)

$DEE_{UE_t}{}^i$, Dependencia Energética Exterior (%)

$IT_{SE_t}{}^i$, Intensidad Técnica del sistema energético (%)

$$Definido\ como\ IT_{SE} = \frac{Consumo\ Final\ de\ Energía\ (ktep)}{Consumo\ de\ Energía\ Primaria\ (ktep)}$$

$GEI_{PIB_t}{}^i$, Intensidad de Emisiones de GEI ($kgeCO_2$/€)

$IPS_{C_t}{}^i$, Índice de Progreso Social corregido (%)

La normalización de indicadores [6] se realiza con el fin de conseguir su agregación en un Índice General de Sostenibilidad Energética (IGSE) con el criterio

siguiente: a una mayor sostenibilidad corresponderá un menor índice, es decir, cuanto menor sea el indicador, mayor sostenibilidad.

Siguiendo este razonamiento, los indicadores se han normalizado atendiendo a los siguientes criterios:

A. Indicadores que ya expresaban un valor porcentual decreciente indicativo de mejora de la sostenibilidad: no se establece ninguna normalización.
B. Indicadores que expresaban un valor porcentual creciente indicativo de mejora de la sostenibilidad: se establece la inversión según la expresión $(100-X_i)$ donde X_i es el indicador sin normalizar.
C. Indicadores que expresaban el valor de la variable a la que representaban: se establece el rango de observación máximo sobre el cual se establece un ratio porcentual.

Para finalizar, en la tabla siguiente se recogen los valores finales del Índice General de Sostenibilidad Energética (IGSE) para las anualidades 2014-2017. El mejor comportamiento sostenible lo presenta Reino Unido, seguido de Francia e Italia. A la cola de sostenibilidad tendríamos a Alemania y España.

Criterio de normalización	Indicador General	Rango	Expresión de Normalización
A	DEE_{UE}	-	DEE_{UE}
C	IEE	90-140	IEE/140
B	IT_{SE}	0-100	$100-IT_{SE}$
C	GEI_{PIB}	0,15-0,40	$(GEI_{PIB})/0,4$
B	IPS_C	0-100	100-IPSc

Tabla 1: Normalización de indicadores generales del IGSE

5. LA DISOCIACIÓN DE LOS TRES PILARES. VALIDACIÓN DEL MODELO

Es ampliamente reconocido que el desarrollo sostenible consta de tres dimensiones íntimamente relacionadas: medioambiente, economía y sociedad [7] y [8], donde cualquier variación en una de ellas afecta de manera significativa a las otras dos [9] y además, se encuentran estrechamente interrelacionadas.

Por tanto, la premisa fundamental del desarrollo sostenible será desvincular esa dependencia y por consiguiente, que la variación en una de las dimensiones influya de manera sostenible en el desarrollo y evolución de las adyacentes. A través del seguimiento de una selección de variables se evalúa la disociación de los tres ámbitos principales vistos hasta ahora: demanda de energía, crecimiento económico y emisiones [10] (Figura 3) que son homólogos a las dimensiones del desarrollo sostenible (naturaleza, economía y sociedad). A los que añadimos los dos nuevos ámbitos específicos de la sostenibilidad energética: regulación de mercados y equidad social.

El concepto teórico en el que se sostiene la validación se denomina desmaterialización, al reducir el consumo de energía aumentando el crecimiento, debe acompañar la reducción del volumen de residuos y emisiones generadas. Como conclusión: será fuente de sostenibilidad producir y por tanto generar valor añadido reduciendo el consumo de energía, que debe acompañarse de una reducción del volumen de residuos y emisiones generadas: sólo entonces habrá sostenibilidad.



Figura 3: Los tres pilares de la sostenibilidad energética

2014	Alemania	España	Francia	Italia	Reino Unido	2015	Alemania	España	Francia	Italia	Reino Unido
DEEue	61,94	72,75	46,24	75,81	46,77	**DEEue**	62,23	72,94	46,00	77,03	37,50
IEE/140	82,00	87,26	88,60	70,26	67,83	**IEE/140**	81,14	87,09	89,04	72,31	67,56
100-IT	28,65	30,64	40,05	20,57	28,00	**100-IT**	28,20	32,24	39,94	22,06	27,53
$GEI_{PIB}/0,4$	72,61	68,27	42,31	54,24	53,38	**$GEI_{PIB}/0,4$**	69,99	70,15	41,35	54,16	44,69
100-SPIc	18,15	24,23	20,45	25,26	20,10	**100-SPIc**	18,00	23,94	20,37	25,06	20,13
	263,35	**283,15**	**237,65**	**246,14**	**216,08**		**259,55**	**286,36**	**236,69**	**250,62**	**197,42**

2016	Alemania	España	Francia	Italia	Reino Unido	2017	Alemania	España	Francia	Italia	Reino Unido
DEEue	63,71	71,49	47,36	77,65	35,68	**DEEue**	63,91	73,94	48,59	76,98	35,35
IEE/140	80,11	85,32	86,53	70,99	65,41	**IEE/140**	79,04	86,36	84,78	72,19	63,11
100-IT	27,20	30,84	38,10	21,66	25,24	**100-IT**	26,68	32,87	37,81	22,67	24,58
$GEI_{PIB}/0,4$	67,20	63,92	40,22	52,21	45,41	**$GEI_{PIB}/0,4$**	63,85	63,75	40,01	50,85	45,53
100-SPIc	17,67	23,60	20,11	24,85	19,55	**100-SPIc**	17,60	23,29	20,00	24,24	19,71
	255,89	**275,17**	**232,31**	**247,35**	**191,29**		**251,08**	**280,22**	**231,19**	**246,92**	**188,29**

Tabla 2: Resumen de resultados del IGSE para las anualidades 2014-2017

Sostenibilidad	Crecimiento Económico Sostenible	Seguridad de suministro y demanda de energía			Mercados y Regulación*	Emisiones		Equidad social	Rtdo.
	IEE-PIB	DEE-CEP	DEE-PIB	PIB-CEP	IT-IEE	PIB_{PC}-IE	PIB-E	SPI_C-GINI	
UK	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	NO	
Francia	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	
Italia	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	
Alemania	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	
España	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	

Tabla 3: Resumen del estudio de comportamientos sostenibles en función de la disociación de variables

Para la validación del modelo se ha realizado el seguimiento de variables durante una década, relativas a los cinco grandes ámbitos descritos en el punto anterior, buscando la disociación de variables (emisiones-crecimiento-demanda). Estudiando las correlaciones de las variables dentro de cada uno de los cinco ámbitos y analizando si su relación es sostenible o no, se han obtenido los siguientes resultados cualitativos (Tabla 3).

Se han utilizado variables relativas a la Intensidad Energética de la Economía (IEE), Dependencia Energética Exterior (DEE), Consumo de Energía Primaria (CEP), Intensidad Técnica del sistema energético (IT), Producto Interior Bruto (PIB), Producto Interior Bruto per cápita (PIB_{PC}), Emisiones de GEI (IE), Intensidad de Emisiones de GEI (IE) e Índice de Progreso Social (SPI) y la Desigualdad (GINI) para cada nación, correlacionados bidimensionalmente y analizando si su evolución correspondía con un comportamiento sostenible o no sostenible. Los resultados devuelven que Reino Unido es el país más sostenible, seguido de Francia e Italia. A la cola de esta clasificación se encontraría Alemania y España.

Por último, haciendo referencia a factores determinantes de sostenibilidad en los sectores productivos y más concretamente en el sector industrial, teniendo en consideración que serán críticos los tres grandes ámbitos de la sostenibilidad energética: contaminación, crecimiento y demanda de energía, se pueden establecer correlaciones entre las siguiente variables referidas a dicho sector: Valor Añadido Bruto vs Consumo Final de Energía, Intensidad de Emisiones vs Consumo Final de Energía, y por último y dado que el vector eléctrico supone un importante flujo energético: Consumo Final de Electricidad vs Valor Añadido Bruto. Analizando esta última correlación los países que muestran sostenibilidad son Francia y Reino Unido [6].

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se establece un modelo de indicadores idóneos a partir del concepto de Sostenibilidad Energética en cinco grandes ámbitos en base a los cuales realizar la desagregación de indicadores. Estos cinco grandes ámbitos son: la seguridad de suministro, la regulación de la demanda y los mercados, el acceso en equidad a la energía, el impulso del crecimiento y el desarrollo económico sostenible, y el respeto por el medioambiente y la biodiversidad.

Se propone un modelo caracterizado por el Índice General de Sostenibilidad Energética (IGSE) compuesto por los indicadores generales definidos para cada uno de los cinco ámbitos representativos de la sostenibilidad energética. Cuanto menor sea el valor del IGSE, mayor será la sostenibilidad obtenida.

Se ha realizado la validación del modelo aplicando la teoría de la desmaterialización a través de un análisis de correlación para justificar la disociación de los pilares crecimiento-emisiones-demanda con carácter cualitativo. No existe ningún otro modelo que ofrezca una validación del mismo utilizando la teoría de la desmaterialización.

El IGSE permite superar la interpretación de los indicadores de manera independiente, ya que tiene en cuenta los múltiples ámbitos de la sostenibilidad energética. Por ejemplo, la Intensidad Energética de la Economía (IEE), no resulta un indicador que por sí solo pueda evidenciar un comportamiento sostenible o no de los países y de su actividad. Ya que una evolución positiva de este indicador puede no significar una mejora de las condiciones de sostenibilidad energética del país, sino de una simple reducción de la demanda de energía ante un escenario, por ejemplo, de crisis económica.

Además, las diferentes coyunturas económicas, energéticas, territoriales y sociales de los diferentes países, hacen que el modelo deba adaptarse, es decir, no todas las variables serán las más idóneas para realizar un análisis de la situación energética en las distintas naciones. El modelo plantea también el concepto de sostenibilidad local, seleccionando las naciones comparables como aquellas que tengan sus parámetros de coyuntura dentro de unos límites de variables de agrupación determinadas.

REFERENCIAS

[1] Naredo, J.M. (1996) Sobre el origen, el uso y el contenido del término sostenible. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. La construcción de la ciudad sostenible. Madrid

[2] UN (2016) - Sustainable Development Goals [on-line]. Sustainable Development Goals. 17 Goals to Transform our World 2016 [Consulted in 2017]. Available at: http://www.un.org/sustainabledevelopment/

[3] World Energy Council. (2014). Energy Trilemma Index. Benchmarking the sustainability of national energy systems. World Energy Council. London: World Energy Council.

[4] Norton, B. G. (1992). Sustainability, Human Welfare and Ecosystem Health . (T. W. Press, Ed.) Environtmental Values , 97-111.

[5] Fernandez-Baldor, A. (2012). Technologies for Freedom: a technological model to a human and sustainable development. Desafíos de los Estudios del Desarrollo: Actas del I Congreso Internacional de Estudios del Desarrollo.

[6] Martinez, A. (2017) Análisis de Indicadores Macroeconómicos para la Sostenibilidad Energética. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández.

[7] Ghosh, N. (2008). The road from economic growth to sustainable develoment: How was it traversed?

[8] Munasinghe, M. (1992). Environmental economics ans sustainable development. UN Earth Summit.

[9] Lior, N. (2010). Sustainable energy development: The present (2009) situation and possible paths to the future. Energy , 3976-3994.

[10] Vera, I. (2005). Indicators for sustainable energy development: an initiative by the International Atomic Energy Agency. Natural Resources Forum , 274-283.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada a través del proyecto "Subvenciones para Grupos de Investigación Consolidables AICO/2018/102", de la Dirección General de Universidad, Investigación y Ciencia de la Consellería de Educación, Investigación, Cultura y Deporte de la Generalitat Valenciana.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9183-1.pdf

Cod. 9386 | Tecnología industrial | 3310.03 Procesos industriales

Nuevo proceso de fabricación de rigidizadores estructurales aeronáuticos a partir de rigidizadores rectos usando un molde adaptativo

A new manufacturing process of structural aeronautical stringers from straight stringers using an adaptative mould

Imanol Ansola-Arizmendiarrieta[1], Natalia Gutierrez-Perez-de-Eulate[1], Ibai Berrotaran-Saavedra[1], Peio Olaskoaga-Arrate[1], Koldo Gondra-Zubieta[2], Patricia Tabares-Fernandez[3] y Francisco-Javier Vallejo-Rasero[1]

[1] IDEKO (España)
[2] GAIKER (España)
[3] FIDAMC (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9386

Es sabido que la introducción de materiales compuestos de matriz polimérica en piezas estructurales de aviones, trenes y palas de aerogeneradores ha impulsado de manera significativa su eficiencia, principalmente por la importante disminución de peso, lo que implica ahorro en combustible y descenso del impacto medioambiental [1, 2, 3].

Sin embargo, en los últimos años se observan dificultades para incrementar la presencia de estos materiales, por ejemplo, en aeronaves, debido a que ya no es suficiente con la disminución de peso, sino que también debe suponer una reducción de los costes de fabricación y de los plazos de amortización de las inversiones [4, 5, 6]. Además, los procesos de fabricación de composites deben responder a tasas de fabricación y calidad muy altas, y deben facilitar en gran medida los requerimientos de mantenimiento y reparación.

Es por esto por lo que, los nuevos desarrollos de procesos de fabricación de piezas estructurales deben perseguir equilibrar los costes productivos, el nivel de inversión necesaria y la productividad. En los procesos actuales de fabricación de piezas estructurales, este equilibrio, no está correctamente balanceado, debido a que, en una etapa anterior del desarrollo de procesos de fabricación de composites, esto no era una prioridad.

Un ejemplo claro se da en los procesos de fabricación de los rigidizadores de alas y estabilizadores de aeronaves. Los rigidizadores son piezas que, adheridas a las pieles de ala, otorgan a estas, la rigidez requerida. Son piezas extremadamente esbeltas, hasta 24 m de longitud, con anchos y altos no superiores a 150 mm. Las secciones de dichas piezas pueden variar desde secciones en forma de C o T (Figura 1) hasta secciones en forma de Ω. Una característica muy importante de estas piezas es que tienen curvaturas variables, los ángulos de las secciones también son variables y presentan cambios de pendientes y de espesor para adaptarse a las geometrías de los laminados principales a los que van adheridos (piel del ala o estabilizador). Es decir, una piel de un ala de 4 m de ancho y 20 m de longitud, aproximadamente, podría contener 10 rigidizadores diferentes cuya única similitud es la forma general de la sección (C, T u Ω).

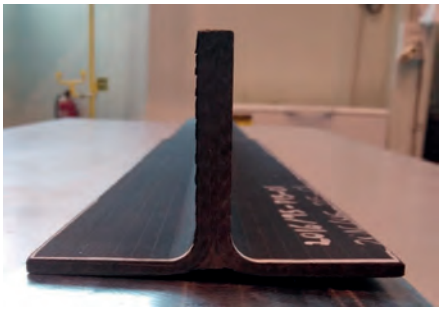


Figura 1: Rigidizador de pieza estructural aeronáutica con sección en T

Actualmente, el proceso de fabricación de estos rigidizadores implica disponer de un molde diferente para cada rigidizador, en el cual se laminan las telas en sus orientaciones determinadas de manera manual o en algunos casos, automatizada, pero de manera poco productiva utilizando procesos de Automated Tape Laying (ATL) o Automated Fiber Placement (AFP). Una vez están laminadas las telas en una parte del molde, por medio de aplicación de presión y temperatura con una membrana (Hot Forming) o contramolde se obliga a las telas a adaptarse a la forma del molde [3, 7]. Es evidente que la necesidad de disponer de moldes diferentes para cada tela supone un nivel de inversión no admisible en la actualidad.

Una alternativa a este proceso viene de la mano de tecnologías que actualmente están en sus etapas finales de desarrollo como es el ADMP® de DANOBAT, tecnología por medio de la cual, se pueden laminar de manera altamente productiva tejidos multiaxiales, consiguiendo una tasa de laminación, en el peor de los casos, 10 veces superior a las tasas de laminación convencionales, conseguidas por el ATL o el AFP [8, 9]. Por medio del ADMP®, se podrán laminar a alta velocidad las telas necesarias para la fabricación de los rigidizadores y por medio de procesos sencillos de corte y conformado, se podría disponer de rigidizadores rectos de una manera altamente productiva.

Es en esta etapa del proceso donde se centra el presente trabajo, en el cual partiendo de un rigidizador recto y por medio de un molde adaptativo se consigue obtener la geometría final del rigidizador. En estudios previos con preimpregnados [10], y no con fibra seca como en el presente trabajo, se ha estudiado la viabilidad del paso de rigidizador recto a rigidizador curvo. Este nuevo proceso da lugar a un aumento de productividad y a una disminución del coste debido a la presencia de un único molde. El comportamiento de la preforma del rigidizador a estas variaciones se evaluará analizando la formación de arrugas tanto interna como externamente. Aunque la evaluación cuantitativa de las arrugas no está normalizada, un criterio objetivo comúnmente aceptado por los especialistas aeronáuticos es que una ondulación de las fibras es arruga, y por lo tanto es un defecto que hace que la pieza no sea válida, cuando la altura máxima de la ondulación de una capa de fibras es mayor que el espesor de la capa de fibras.

Para el desarrollo de la automatización de esta tecnología de preformado mediante molde adaptativo se diseñará y fabricará un prototipo a escala que constará de un molde seccionado con determinados actuadores capaces de deformar

el molde en las diferentes geometrías necesarias.

1. EXPERIMENTAL

1.1. MATERIALES

Los materiales de las preformas de los rigidizadores fueron tejidos uniaxiales y biaxiales de fibra de carbono de calidad aeronáutica en orientaciones 0, 90, 45 y -45 º, de Saertex. Todos ellos llevaban una ligera aplicación (2-5 g/m^2) de "binder" termoplástico (Epikote 05311, de Hexion) para la realización de la compactación. Para el estudio de las características del molde adaptativo se usaron siliconas de moldeo en frío (Elastosil M4470) y chapa de acero inoxidable de 1,5 mm de espesor. Para el cierre y deformación del molde se utilizó bolsa de vacío de referencia (NBF-740-LFT, de Airtech) sellada con masilla adhesiva (VBS-230, de Airtech). Para la validación en pieza acabada se realizaron infusiones con la resina RTM6.

1.2. GEOMETRÍA Y FABRICACIÓN DE RIGIDIZADOR RECTO

Los rigidizadores de las pieles del ala tienen principalmente dos características, curvatura y presencia de "staggers". La curvatura es la asociada a la geometría de la piel del ala en los dos planos y el "stagger" es un cambio brusco de pendiente debido a los cambios de espesor de la piel del ala. Teniendo en cuenta la geometría y dimensiones de un ala real se definieron las dimensiones de un demostrador de rigidizador recto en forma de "T" a escala, como se muestra en la siguiente Figura 2 junto con el diseño del demostrador del rigidizador.

El rigidizador recto se fabricó mediante el preformado independiente de dos L's rectas utilizando un molde calefactado a 120 ºC y aplicando la presión mediante bolsa de vacío consiguiendo una presión negativa de aproximadamente 0,985 bar. Una vez fabricadas, las dos L's se juntaron junto con un perfil uniaxial de fibras de carbono, denominado "rovin", que rellena el hueco que forman los radios exteriores de las dos L's.

1.3. VIABILIDAD DEL PROCESO DE DEFORMACIÓN

Con el conjunto formado por las dos L's y el "rovin", se dispondría de un rigidizador recto que se deformaría para adaptarlo a su geometría final con un molde adaptativo. Teniendo en cuenta que este proceso es completamente novedoso se realizó un estudio de viabilidad del nuevo proceso de deformación de rigidizador recto. Se estudiaron principalmente 4 variables:

- Material del molde. Se trabajo desde materiales deformables como silicona hasta materiales rígidos seccionados, para otorgar deformabilidad al molde.
- Geometría del molde. En el caso de los moldes de silicona la geometría era muy simple albergando una cavidad para alojar el rigidizador con sección en T. En el caso de los moldes seccionados la geometría era mucho mas compleja para poder dar lugar a curvaturas cóncavas y convexas.
- Tipo de fuerza de cierre del molde. Se aplicaron fuerzas de manera mecánica en el cierre del molde. Se aplicó esta fuerza en cinco zonas de aproximadamente 150 mm. Asimismo, también se realizó el cierre del molde introduciéndolo en un film polimérico sellado del cual salía un tubo por medio del cual se realizaba vacío.
- Tipo de fuerza de deformación del molde. La deformación del molde se realizó desplazando los elementos mecánicos de cierre uno respecto del anterior en función de las diferentes formas requeridas. También se realizo la deformación del molde por medio de bolsa de vacío, obligando a adaptarse al molde a la forma de un utillaje rígido con la forma final mecanizada.

En todos los casos el proceso de deformación se realizó a 120 ºC y el desmoldeo de la preforma a temperatura ambiente. El calentamiento se llevo a cabo mediante mantas calefactoras y el control de temperatura se realizó con termopares.

La evaluación de los resultados se realizó mediante el análisis microscópico de las ondulaciones de las capas de fibras presentes en le rigidizador. Las imágenes de microscopía óptica fueron tomadas con un microscopio modelo Eclipse LV150 de Nikon. Previamente, se llevó a cabo la preparación metalográfica de las muestras empleando una pulidora Buehler modelo Phoenix 4000. El desbaste se realizó utilizando una lija lubricada con agua y paños con partículas de diamante de 9 y 3 micras. Todas las imágenes se tomaron a 10 aumentos y las ondulaciones se caracterizaron midiendo tanto la longitud de estas, como su altura máxima.

1.4. DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE PROTOTIPO DEL MOLDE ADAPTATIVO

Se realizó el diseño completo desde el concepto hasta el despiece. Asimismo, se realizó la fabricación, el montaje y la validación del prototipo.

Característica	Ala Real	Demostrador
Longitud (m)	10-30	1,2
Espesor del alma (mm)	8-12	10
Altura del alma (mm)	50-75	75
Anchura del pie (mm)	50-100	50
Radio de curvatura (m)	>30	10
Altura de "stagger" (mm)	5-15	15
Rampa de "stagger"	1:20	1:20

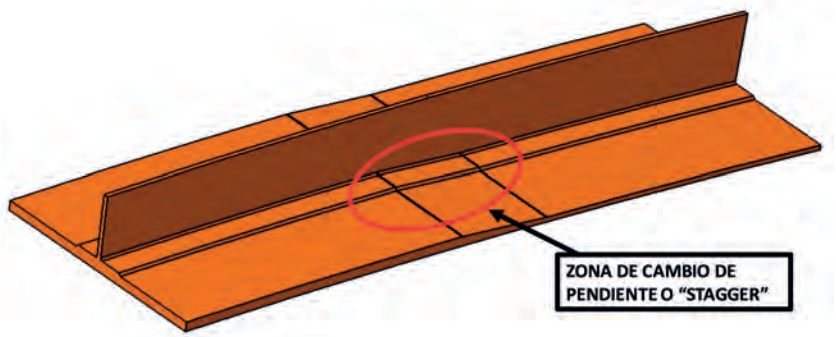


Figura 2: Especificaciones y diseño del rigidizador

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL PROCESO DE DEFORMACIÓN DEL RIGIDIZADOR RECTO

2.1.1. Caracterización del rigidizador recto

La validación del nuevo proceso se llevó a cabo mediante la comparación de las ondulaciones de las fibras de la preforma infusionada en toda la sección de la pieza. Esta comparación se ha realizado entre el rigidizador recto de parti-

da y los rigidizadores resultantes de los diferentes procesos de deformación. Para ello se caracterizó el rigidizador recto (*Figura 3*), observándose una ondulación de aproximadamente 0,2 mm, equivalente al espesor de una capa uniaxial de fibra de carbono. Teniendo en cuenta que no se había aplicado ninguna deformación al rigidizador, se consideró que esta ondulación es inherente al material y cualquier ondulación superior a ésta, se considerará una ondulación o arruga generada en los procesos de deformación posteriores.

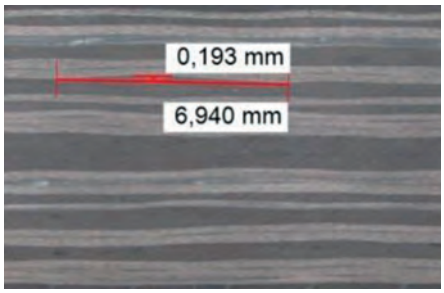


Figura 3: Micrografía de las ondulaciones de un rigidizador recto

2.1.2. ANÁLISIS DEL MATERIAL Y GEOMETRÍA DEL MOLDE ADAPTATIVO

El material del molde adaptativo debía ser lo suficientemente rígido para poder aplicar cierta presión a la preforma en el momento del cierre, pero lo suficientemente deformable en los planos de curvatura y de "stagger" para poder adaptarse a la forma final de rigidizador.

Se fabricó un molde de silicona con cavidad en forma de T, y se fijaron flejes metálicos a las paredes exteriores del molde para poder deformarlos mediante un utillaje diseñado para tal fin. El utillaje se componía de cinco dispositivos de cierre de molde, los cuales ejercían más o menos presión en función de la tensión a la que sometíamos los muelles. En la Figura 4 se muestra el molde de silicona y el utillaje para su deformación. Con este molde y utillaje se realizó la deformación del rigidizador recto hacia una curvatura de radio 10 m. Los resultados obtenidos para una curvatura de 10 m de radio se muestran en la Figura 5. Como se observa en la micrografía, la distancia entre el punto más bajo y el más alto de la ondulación, es de 1,299 mm, aproximadamente 6 veces mayor que la ondulación inherente al material de partida en el rigidizador recto (0,2 mm).

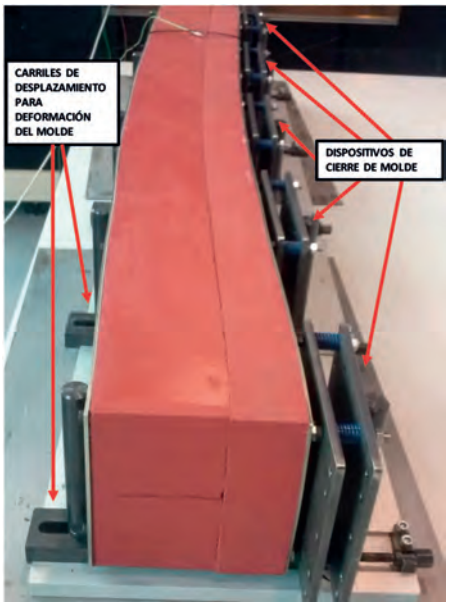


Figura 4: Molde de silicona y utillaje para deformarlo

Una de las razones más importantes de la aparición de arrugas en la preforma del rigidizador puede ser los distintos esfuerzos a los que se somete a las distintas capas de fibra en la deformación. La deformación del molde al curvarlo se puede comparar a la deformación de una viga apoyada sobre los extremos sometida a una carga. En estas condiciones aparecen dos zonas distintas según el esfuerzo que soportan. Una zona que soporta esfuerzos de tracción, y otra que soporta esfuerzos de compresión. La línea que separa estas dos zonas se denomina fibra neutra. Al curvar el rigidizador que contiene el molde descrito, estamos sometiendo a las fibras de carbono que se encuentran por debajo de la fibra neutra a esfuerzos de compresión. Estos esfuerzos de compresión generan arrugas en las fibras de carbono. Estas arrugas se producen en la zona donde el desplazamiento con respecto a la planitud es mayor, como se observa en la Figura 5.

Para evitar que se formen estas arrugas debemos diseñar un molde que asegure que todas las fibras de la preforma contenida en él, sufran esfuerzos de tracción. Para ello, se diseñaron moldes basados en chapas de acero inoxidable sin ningún tratamiento térmico seccionadas, unidas en los extremos como se muestra en la Figura 6.

Se diseñaron tres moldes seccionados. El primero para realizar curvatura convexa, es decir las secciones pivotan sobre la parte inferior del molde. La parte superior de cada sección no está unida, ni a la anterior ni a la siguiente, por lo que al deformar el molde de forma convexa desde la parte inferior a la superior únicamente se producen esfuerzos de tracción en las fibras del rigidizador.

El segundo, se diseñó para realizar un "stagger" en la parte central, es decir, curvatura convexa y cóncava en secciones adyacentes. Por lo tanto, la parte central se divide en dos partes. Las secciones de la primera parte pivotan en la parte de arriba y se separan en la parte de abajo y las secciones de la segunda parte se comportan al revés.

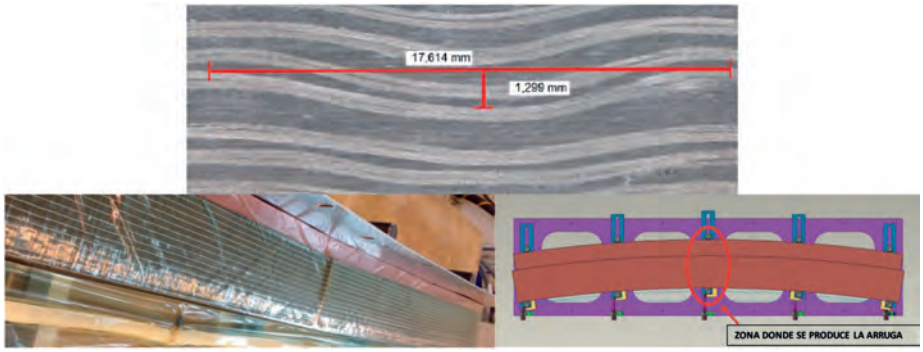


Figura 5: Micrografía de las ondulaciones del rigidizador deformado (arriba), arruga formada por las fibras de carbono sometidas a esfuerzos de compresión (izquierda) y detalle de la zona del molde deformado con el utillaje donde se produce la arruga (abajo)

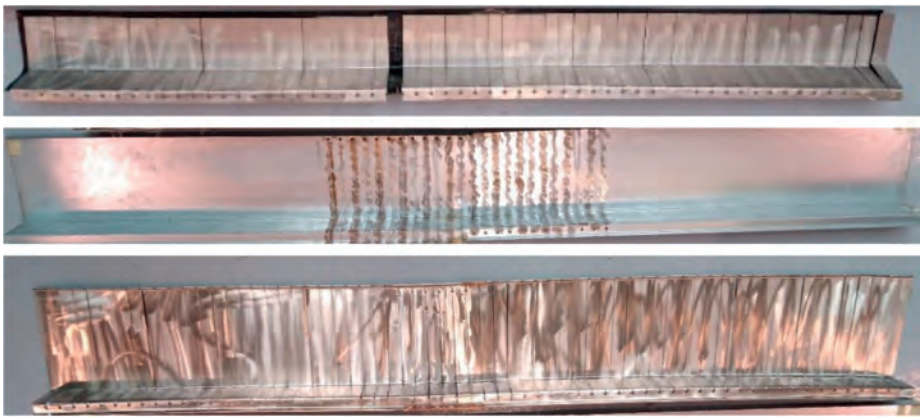


Figura 6: Moldes de acero seccionado

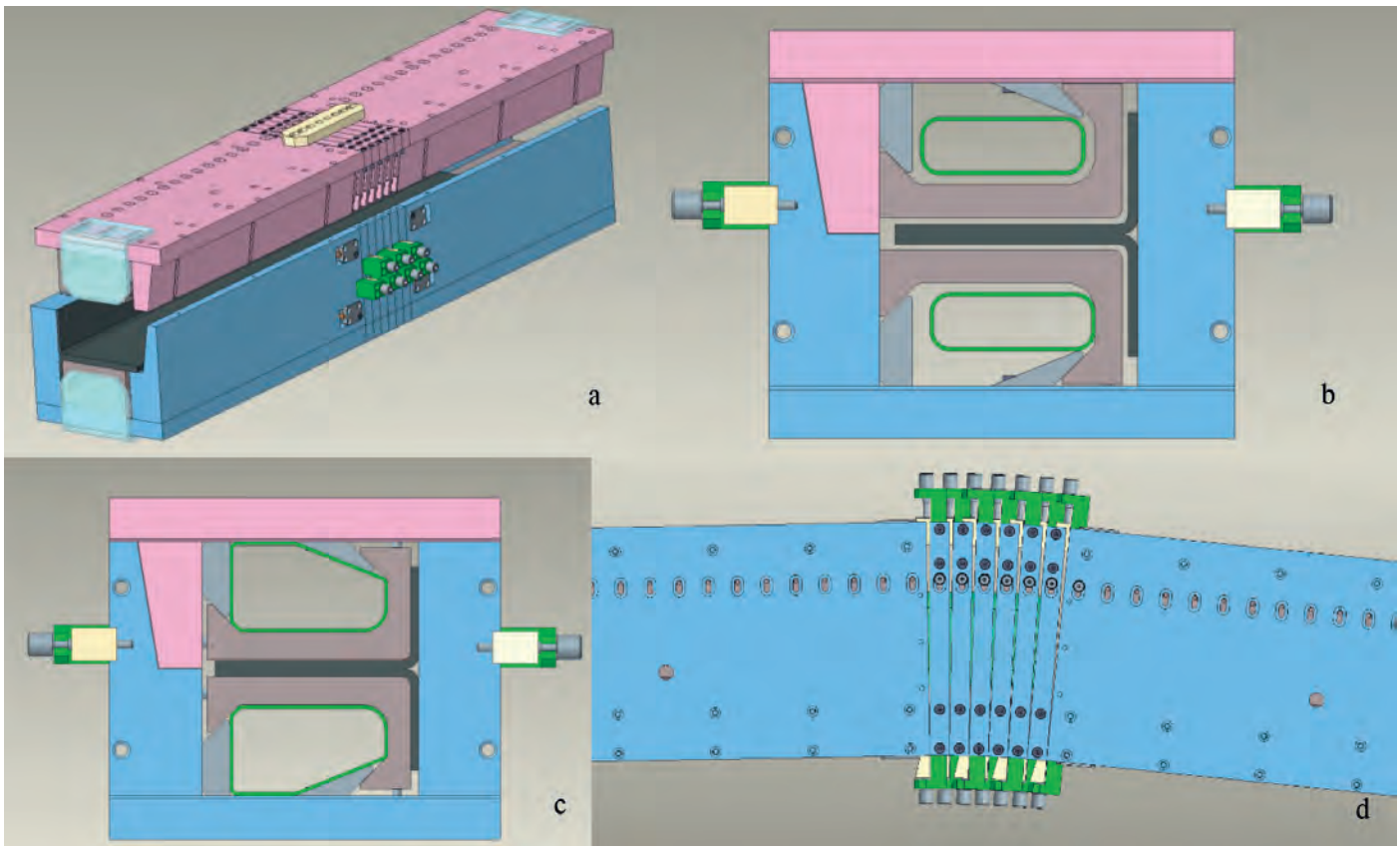


Figura 7: Diseño del molde adaptativo (a). Sección en posición molde abierto (b). Sección en posición molde cerrado (c). Molde en posición de deformación (d)

El tercer molde se diseñó para realizar un "stagger" y curvatura simultáneamente, por lo tanto, el molde tiene cuatro partes. Los dos extremos están dispuestos para hacer curvatura convexa y la parte central para hacer un "stagger" como en el caso anterior.

La incorporación al proceso de estos moldes disminuía en gran medida la aparición de arrugas, sin embargo, no se pudieron erradicar por completo.

2.1.3. Análisis de fuerzas de cierre y curvado del molde

Se estudiaron diferentes formas de ejercer las fuerzas de cierre y de deformación del molde. Fundamentalmente, se comparó el comportamiento ejerciendo fuerzas mecánicas elevadas con peso y sargentas, lo que daba lugar a zonas con importantes diferencias de presión, con fuerzas más bajas pero homogéneas conseguidas con vacío. Se observó, que el vacío tanto para cerrar el molde recto como para deformarlo eliminaba por completo la aparición de arrugas. Esto era debido, principalmente, a la homogeneidad de la presión. Esta desaparición de arrugas se comprobó en rigidizadores tanto con curvatura como con "stagger" utilizando el molde seccionado, cerrado y deformado por bolsa de vacío. La ondulación observada, 0,186 mm, era incluso menor que la definida como inherente al material, 0,200 mm.

2.2. DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACION DE PROTOTIPO DE MOLDE ADAPTATIVO

Una vez estudiada la viabilidad del proceso de deformación del rigidizador recto se pasó a diseñar un molde adaptativo automatizable para deformar el rigidizador recto basado en las conclusiones a las que se llegó en el apartado anterior.

En la Figura 7 se muestra el diseño de molde adaptativo, el detalle de una sección, en modo de molde abierto y en modo de molde cerrado y el molde adaptativo en posición de deformación convexa. Este dispositivo se compone de 6 secciones independientes unidas únicamente por un hilo tórico. A cada lado de las secciones se encuentra una pieza para darle la longitud del demostrador definido (1200 mm). Cada sección consta de un marco compuesto por piezas que se pueden separar para introducir la preforma del rigidizador. Este marco contiene las piezas que componen el molde en forma de "T" que pueden desplazarse en el plano vertical. Este desplazamiento y el cierre del molde ocurre por el hinchamiento del tubo

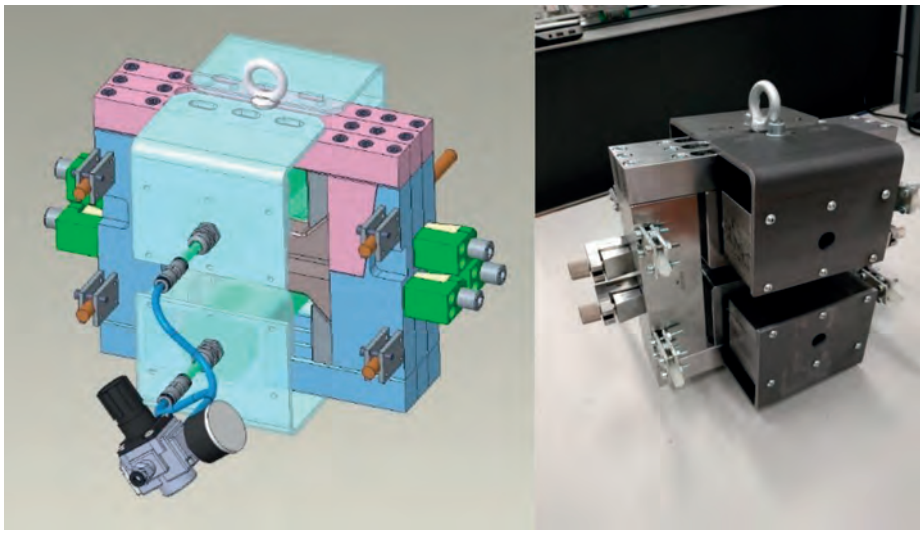


Figura 8: Dispositivo formado por tres secciones, fabricado y montado

neumático que está alojado en la cavidad adyacente al molde en T, en cada uno de los lados. Para desplazar una sección con respecto a la otra aplicando únicamente esfuerzos de tracción en todas las fibras de la preforma, se dispone de una cuña que se introduce entre las secciones haciendo que se separen solo en uno de los lados. De esta manera podemos producir curvaturas convexas o cóncavas en función de las necesidades en todo el largo del molde.

Para validar los conceptos de diseño se necesitaba comprobar experimentalmente tres hipótesis:

- El hinchamiento de los tubos neumáticos proporciona a las piezas en forma de "L" que forman el molde en forma de "T" un movimiento de cierre uniforme y simétrico que da lugar al cierre del molde.
- La fuerza de cierre del molde proporcionada por el tubo neumático no debía generar ninguna componente longitudinal que fuera superior a la fuerza necesaria para deformar el hilo tórico que mantiene unidas las diferentes secciones. De esta manera, el cierre del molde no provoca desplazamientos entre secciones.
- El desplazamiento de las cuñas da lugar a un movimiento de las secciones que provocan únicamente esfuerzos de tracción en las fibras del rigidizador.

Para comprobar estas tres hipótesis se fabricaron tres secciones junto con cuatro alojamientos para los extremos de los tubos neumáticos como se observa en la Figura 8. El hilo tórico empleado de 6,5 mm de diámetro se tensó utilizando el dispositivo de plaquitas que se observa en la Figura 8. Se fabricaron dos tubos neumáticos cerrados de 150 mm de longitud y 80 mm de diámetro. El espesor de la pared del tubo era de 3 mm. Se realizaron experimentos de hinchamiento desde 0 hasta 3 bar, y se comprobó que el desplazamiento de las piezas que formaban la cavidad del molde era uniforme y simétrico. Asimismo, el hinchamiento de los tubos no generaba desplazamientos entre las secciones. Por último, se comprobó que una vez que el hilo tórico estaba tensado, y el molde cerrado, la entrada de las cuñas en el hueco entre dos secciones provocaba un desplazamiento controlado y medible.

3. CONCLUSIONES

La caracterización de la ondulación inherente al material se puede realizar por microscopia, considerando que una ondulación es una arruga no admisible en un componente aeronáutico, cuando la cresta de esa ondulación es superior al espesor de la capa de material que forma la ondulación. En el caso del material del que se compone el rigidizador recto caracterizado en el presente trabajo, la ondulación observada es inferior a 0,2 mm, mientras que el espesor de cada capa es aproximadamente 0,25 mm.

Cuando sometemos a las fibras que componen el rigidizador a una deformación convexa aparecen ondulaciones de 1,3 mm, es decir arrugas no admisibles en componentes aeronáuticos. Estas arrugas aparecen en la parte inferior del rigidizador. Una de las principales razones de la aparición de arrugas es que las fibras están sometidas a esfuerzos de compresión debido a que el molde presenta la fibra neutra aproximadamente en la mitad de la cavidad donde se aloja el rigidizador, por lo que comprime las fibras que se encuentran por debajo.

El uso de dispositivos mecánicos para cerrar el molde y deformarlo, proporciona fuerzas no uniformes en el molde, de esta manera se concentran en ciertos puntos del rigidizador presiones altas mientras otras partes del rigidizador están sometidas a presiones leves. Estas diferencias de presión originan arrugas.

La utilización de moldes seccionados de chapa de acero diseñados para que la fibra neutra siempre se encuentre por debajo de la cavidad que aloja al rigidizador, asegura que todas las fibras que lo componen estén sometidas a esfuerzos de tracción, y no aparecen ondulaciones superiores a las ondulaciones inherentes al material.

El vacío proporciona fuerzas uniformes de cierre y de deformación del molde. El cierre del molde por medio del vacío se consiguió envolviéndolo en un film sellado en el cual se realizaba vacío. Para conseguir la forma final del rigidizador se deformo el molde envolviendo éste junto con un útil de la forma final en un segundo film sellado, al cual también se le aplicaba vacío. De esta manera se conseguían rigidizadores con curvatura y "stagger" con ondulaciones similares a las ondulaciones inherentes al material.

La posibilidad de automatización de este nuevo proceso se ha validado mediante el diseño y fabricación de un prototipo compuesto de tres secciones independientes, demostrándose la capacidad de desplazar una sección con respecto a la otra originando únicamente esfuerzos de tracción, así como la capacidad de generar presiones de cierre uniformes e incluso superiores a 1 bar por medio de tubos neumáticos.

4. LÍNEAS FUTURAS

Se fabricará el prototipo completo compuesto por seis secciones y una parte fija a cada extremo para completar la longitud del demostrador de rigidizador definido. En este prototipo se incorporarán los sensores adecuados para monitorizar las variables del proceso fundamentalmente destinadas a controlar la temperatura y las presiones a las que sometemos al rigidizador. Asimismo, se trabajará en el desarrollo de métodos de inspección no destructiva para evaluar la calidad del rigidizador tanto detectando y cuantificando las ondulaciones de las fibras como analizando la orientación de estas.

REFERENCIAS

- Balasubramanian M, Composite Materials and Processing, CRC, 2014
- Campbell FC, Manufacturing Processes for Advanced Composites, Elsevier 2004
- Breuer UP, Commercial Aircraft Composite Technology, Springer, 2016
- Hagnell MK, Åkermo M, A composite cost model for the aeronautical industry: Methodology and case study, Composites Part B. 2015. Vol. 79. P. 254-261. DOI: https://10.1016/j.compositesb.2015.04.043
- Soares BA, Henriques E, Ribeiro I, Freitas M, Cost analysis of alternative automated technologies for composite parts production, International Journal of Production Research. 2018. P 1-14. DOI: https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1508903
- Schubel PJ, Cost modelling in polymer composite applications: Case study – Analysis of existing and automated manufacturing processes for a large wind turbine blade, Composites: Part B. 2012. Vol. 43. P. 953–960. DOI: https://10.1016/j.compositesb.2011.11.036
- Fauster F, Schillfahrt C, Hueber C, Schledjewski R, Automated profile preforming for structural components, Sci Eng Compos Mater. 2016. P. 1-20. DOI: https://doi.org/10.1515/secm-2015-0377
- Proving viability of dry fabrics, infusion for large structures, Composites Word, April 2019- P. 18-21.
- Automation of dry fibre composites materials: current state and future possibilities. Buelga R, Moreno JA, Rubio L, SAMPE Europe Conference 2018 Southampton.
- Chamorro FJ, Mora M, http://revista.aemac.org/, Vol 2, nº3, pag. 115-118.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ministerio de economía y competitividad por su apoyo por medio del proyecto Famast (RTC-2016-5148-4), con el que se ha podido financiar parte de esta investigación.

Mejora del dimensionamiento de una red de calidad del aire mediante el empleo de métodos estadísticos multivariantes

Improvement of the dimension of an air quality monitoring network by means of multivariate statistical methods

Marta Doval-Miñarro[1], Jose A. Egea[2] y Ginesa Navarro-Cobacho[1]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena (España)
[2] CEBAS-CSIC (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9250

1. INTRODUCCIÓN

El Real Decreto 102/2011 de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, traspone a la legislación nacional la Directiva europea 2008/50/EC. En su Anexo IV establece el número mínimo de estaciones de medida fijas necesarias para llevar a cabo el control atmosférico en función del número de habitantes en cada zona o aglomeración.

Las técnicas estadísticas multivariantes se pueden definir como el conjunto de métodos estadísticos cuya finalidad es analizar simultáneamente conjuntos en los que hay varias variables medidas para cada individuo u objeto estudiado. Tal es el caso de los datos recogidos por las estaciones de vigilancia de las redes de calidad del aire: en cada estación se miden diferentes contaminantes y de cada uno de ellos se tiene un dato cada cierto tiempo. El análisis de componentes principales (ACP) es posiblemente la técnica estadística multivariante más empleada en el campo de contaminación ambiental. Concretamente, en calidad de aire, ha sido utilizada en numerosos estudios para determinar el origen de la contaminación atmosférica [1]–[5] y para optimizar el número y la ubicación de las estaciones de medida [6]–[13]. Sin embargo, se ha observado que, en la gran mayoría de trabajos, se aplica a contaminantes de forma individual. Como se ha comentado, lo habitual es que en las estaciones de vigilancia ambiental se midan varios contaminantes simultáneamente de forma que las redes son compartidas por todos ellos y no independientes. En este sentido, a la hora de saber si la red está sobredimensionada es importante llevar a cabo el análisis estadístico de forma global con todos los contaminantes. Sólo se han encontrado dos estudios que procedan de esta forma [14], [15] y, en ningún caso, se ha realizado una comparación de los resultados con los requisitos de la Directiva 2008/50/EC.

En el presente trabajo se pretende mostrar la utilidad de dos métodos multivariantes (ACP y el análisis de conglomerados o clúster (AC)) para detectar redundancias en las estaciones que conforman una red de vigilancia atmosférica, así como para determinar patrones de comportamiento similares entre los contaminates atmosféricos regulados. La metodología se ha aplicado a la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Región de Murcia (RVCARM), pero es fácilmente extrapolable a cualquier otra red de vigilancia. Además, se pretende conocer la adecuación de los criterios del Real Decreto 102/2011 para asignar el número de estaciones en una zona o aglomeración por comparación del número de estaciones derivado de la legislación con los resultados obtenidos del ACP.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

A efectos de gestión de la calidad del aire, la Región de Murcia está dividida en 6 zonas homogéneas (Figura 1), atendiendo a sus características geográficas, a las actividades humanas y ambientales que en ellas se desarrollan y al tipo de contaminación predominante [16]. Las zonas

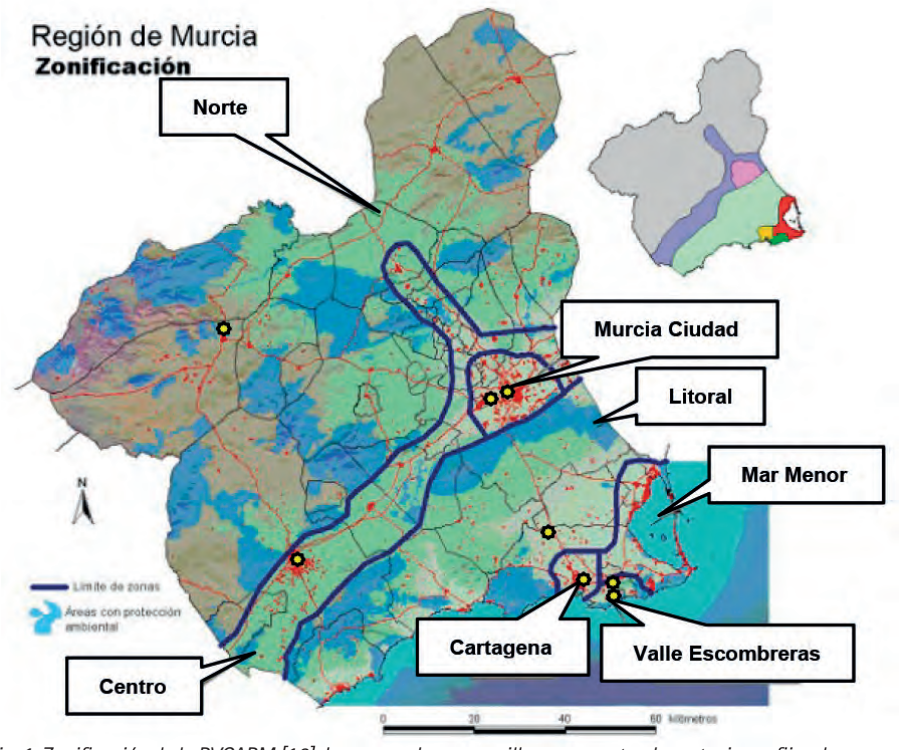


Fig. 1: Zonificación de la RVCARM [16]. Los marcadores amarillos representan las estaciones fijas de vigilancia ambiental. Zona Norte (Caravaca), zona Centro (Lorca), zona Murcia Ciudad (San Basilio y Alcantarilla), zona Litoral-Mar Menor (Aljorra), zona Cartagena (Mompeán) y zona Valle de Escombreras (Escombreras and Alumbres)

	ESTUDIO 1: Contaminantes: NO, NO_2, SO_2, O_3 y PM_{10}	ESTUDIO 2: Campo de Cartagena: Contaminantes: NO, NO_2, SO_2, y PM_{10}
Estaciones	Aljorra	Aljorra
	Alumbres	Alumbres
	Mompeán	Mompeán
	Alcantarilla	Escombreras
	San Basilio	
	Lorca	

Tabla 1. Conjuntos de datos empleados para evaluar patrones de emisión de contaminantes atmosféricos y la redundancia de las estaciones de medida

Norte, Centro y Litoral – Mar Menor tienen gran valor ecológico y cuentan con actividades agrícolas, ganaderas y de industria media. La zona de Murcia es un área típicamente urbana, mientras que la zona de Valle de Escombreras es un área industrial. La zona de Cartagena es una zona tanto urbana como industrial. En la actualidad, existen 8 estaciones fijas de vigilancia y 2 móviles repartidas en las 6 zonas anteriores. Todas las zonas tienen una estación fija de vigilancia, salvo la zona del Valle de Escombreras y Murcia, que cuentan ambas con dos estaciones. En este estudio solo se tendrán en cuenta las estaciones fijas.

2.2. ANÁLISIS DE DATOS Y TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

2.2.1. Obtención de datos

Los datos empleados en este estudio son públicos y están disponibles en la página web de la calidad del aire de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (https://sinqlair.carm.es/calidadaire/).

2.2.2. Lenguaje de programación R

Todos los cálculos de este trabajo se han realizado con el software libre R [17].

2.2.3. Análisis de componentes principales (ACP)

La idea central del ACP es reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos que contienen un gran número de variables interrelacionadas, mientras se retiene la máxima variabilidad posible de las componentes principales (PCs). Éstas no están correlacionadas y se ordenarán de tal forma que unas pocas retengan la mayor parte de la variabilidad presente en todas las variables originales [18]. Su finalidad es la representación de los datos originales en un nuevo espacio ortogonal de funciones que representan los modos principales de variación del sistema. Los modos de variación son las funciones ortogonales empíricas (EOFs) y se corresponden con los vectores propios de la matriz de correlación o covarianza de los datos originales. Las proyecciones de los datos originales en estas nuevas funciones reciben el nombre de componentes principales, siendo su característica principal la inexistencia de correlación entre ellas [19], [20].

Existen diferentes criterios para la selección del número de componentes. En este trabajo se emplearán el criterio de Kaiser y el criterio de la proporción de variabilidad explicada (que suele ser normalmente superior a 0,8 o 0,9).

2.2.4. Análisis cluster (AC)

El análisis de conglomerados (clusters) tiene por objeto agrupar elementos en grupos homogéneos en función de las similitudes o similaridades entre ellos. Los métodos de clústering se dividen en jerárquicos y no jerárquicos. Dentro de los métodos jerárquicos el más empleado es el método de Ward, que ha sido el utilizado en este estudio. Es un método de clústering muy popular que empieza con un único miembro de un grupo, aglomerando dos grupos en cada paso, hasta que todos los datos están en un único grupo, tras n-1 pasos. El criterio para elegir qué par de grupos se unen en cada paso es el siguiente: entre todas las formas posibles de aglomerar en grupos de dos, el par que se une es aquel que minimiza la suma del cuadrado de las distancias entre los puntos y los centroides de sus respectivos grupos. Los resultados de un análisis clúster suelen ser mostrados mediante el uso de un dendrograma o un diagrama de árbol.

2.3. METODOLOGÍA

Se han aplicado las técnicas de análisis multivariante ACP y AC para determinar patrones comunes de emisión de los contaminantes atmosféricos y estudiar la posible redundancia de información en las estaciones de medida. Para ello, se seleccionaron todas las estaciones de la RVCARM con datos de óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de axufre (SO_2), ozono (O_3) y materia particulada < 10 µm (PM_{10}), para el período 2010-2015 inclusive, que es el único en donde existen mediciones de todos los contaminantes en todas las estaciones estudiadas. Las únicas estaciones que no dispusieron de todos los datos fueron:

1. La del Valle de Escombreras, donde no se mide el O_3. Para no dejar esta estación fuera del análisis, se realizó un segundo estudio centrado en la zona del Campo de Cartagena, una comarca con un importante tejido industrial, considerando todos los contaminantes a excepción del ozono.
2. La de Caravaca, en la que no se mide el SO_2. Esta estación no ha sido considerada en ninguno de los dos estudios realizados.

En la Tabla 1 se resumen los dos conjuntos de datos empleados.

Para cada estación y contaminante se descargaron medias diarias en los años estudiados. A continuación, se realizó la media anual de estos valores, y posteriormente, una media global, con lo que se obtuvo un valor medio de concentración para cada contaminante y estación para el periodo de años con datos disponibles. Estos valores medios globales se consideran característicos de cada estación en el período de tiempo estudiado, lo cual viene refrendado por los bajos valores de desviación típica observados y mostrados en la siguiente sección.

3. RESULTADOS

3.1. MEDIAS GLOBALES DE LOS CONTAMINANTES ESTUDIADOS POR ESTACIÓN

Las medias globales para cada contaminante en cada estación se recogen en la Tabla 2.

3.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

3.2.1. Estudio 1

Tras el ACP realizado con los datos del Estudio 1 se observó que con dos componentes se explica al menos un 87% de la variabilidad de los datos. Además, el Criterio de Kaiser (desviación estándar mayor o igual que 1) refrendaría la elección de dos

Estación	NO	NO_2	SO_2	O_3	PM_{10}
Aljorra	5,37 (1,04)	13,40 (3,23)	6,52 (0,91)	62,24 (9,66)	28,83 (1,65)
Alumbres	4,52 (1,24)	15,67 (2,78)	12,38 (3,08)	66,95 (4,95)	23,25 (0,94)
Mompeán	10,48 (1,32)	26,18 (3,82)	9,29 (1,87)	54,03 (7,75)	24,86 (1,93)
San Basilio	20,10 (2,82)	39,34 (4,97)	5,97 (1,63)	50,66 (3,98)	31,85 (3,56)
Alcantarilla	11,63 (3,12)	26,19 (3,47)	4,69 (1,68)	59,41 (2,01)	24,24 (1,67)
Lorca	3,66 (1,21)	12,97 (2,24)	7,62 (1,57)	76,02 (9,74)	25,82 (2,67)

(a)

Estación	NO	NO_2	SO_2	PM_{10}
Aljorra	5,37 (1,04)	13,40 (3,23)	6,52 (0,91)	28,83 (1,65)
Alumbres	4,52 (1,24)	15,67 (2,78)	12,38 (3,08)	23,25 (0,94)
Mompeán	10,48 (1,32)	26,18 (3,82)	9,29 (1,97)	24,86 (1,93)
Escombreras	8,72 (2,29)	21,32 (4,20)	14,49 (2,10)	24,68 (2,32)

(b)

Tabla 2. Medias globales (µg/m3) de las estaciones del Estudio 1 (a) y de las estaciones del Estudio 2 (b). Desviaciones estándar entre paréntesis.

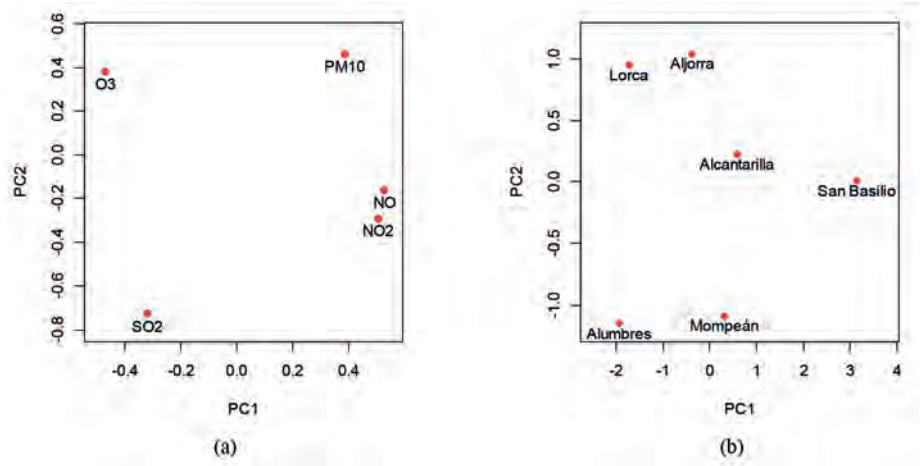


Fig. 2: Gráficas ACP para el análisis de contaminantes de todas las estaciones en función de los contaminantes estudiados (a) y en función de las estaciones de medida (b), para el Estudio 1

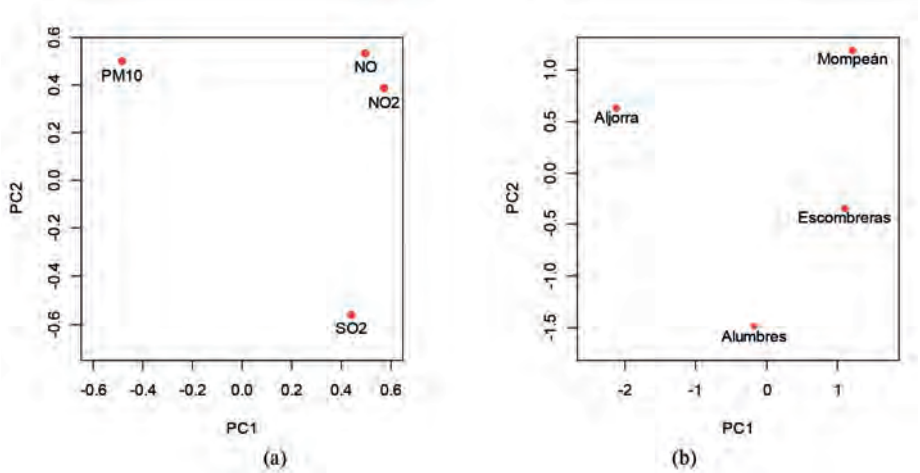


Fig. 3: Gráficas ACP para el análisis de contaminantes de todas las estaciones en función de los contaminantes estudiados (a) y en función de las estaciones de medida (b), para el Estudio 2

componentes (Tabla S1). Asimismo, se generaron dos gráficos donde se representan las componentes 1 y 2 seleccionadas en función de los contaminantes estudiados (Figura 2a) y en función de las estaciones de medida (Figura 2b).

La componente 1 relaciona a los óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) y los contrapone al O_3 y en menor medida al SO_2 y PM_{10}, por lo tanto, las localizaciones que aparezcan a la derecha (San Basilio) presentarán altos niveles de NO y NO_2 con respecto al resto, mientras que las poblaciones que aparezcan en el lado izquierdo (Lorca y Alumbres) presentarán altos niveles de O_3.

En cuanto a la componente 2, es un poco más compleja de analizar porque combina las variables PM_{10}, SO_2 y O_3. Así, poblaciones que aparezcan en la parte superior de la Figura 2b (Aljorra y Lorca) presentarán la siguiente combinación: altos niveles de PM_{10}, bajos niveles de SO_2 y altos niveles de O_3, mientras que las poblaciones que aparezcan en la parte inferior de la Figura 2b (Alumbres, Mompeán) presentarán altos niveles de SO_2, bajos niveles de PM_{10} y relativamente altos niveles de O_3.

Observando las Figuras 2a y 2b se deduce que Alumbres y Aljorra son dos estaciones que se encuentran muy contrapuestas, al igual que ocurre con Lorca y San Basilio.

3.2.2. Estudio 2

En la Tabla S2 se observa que la proporción acumulada de variabilidad supera el 0,9 con dos componentes. Igualmente, el criterio Kaiser verifica que con dos componentes queda explicada gran parte de la información. En la Figura 3 se representan las componentes 1 y 2 seleccionadas en función de los contaminantes estudiados (Figura 3a) y en función de las estaciones de medida (Figura 3b).

La componente 1 contrapone el NO_2 con PM_{10}, por tanto, poblaciones que aparezcan a la derecha en la Figura 3b (Mompeán) presentarán altos valores de NO_2 y bajos PM_{10}, mientras que poblaciones que aparezcan a la izquierda (Aljorra) presentaran altos niveles de PM_{10} y bajos de NO_2.

En la componente 2 se contraponen el NO con el SO_2, por tanto, poblaciones que aparezcan arriba en la Figura 3b (Mompeán y Aljorra) presentarán simultáneamente valores elevados de NO y bajos de SO_2, mientras que poblaciones situadas abajo (Alumbres) presentarán valores mayores de SO_2 y menores de NO.

Observando las Figuras 3a y 3b se deduce que Mompeán y Aljorra son dos

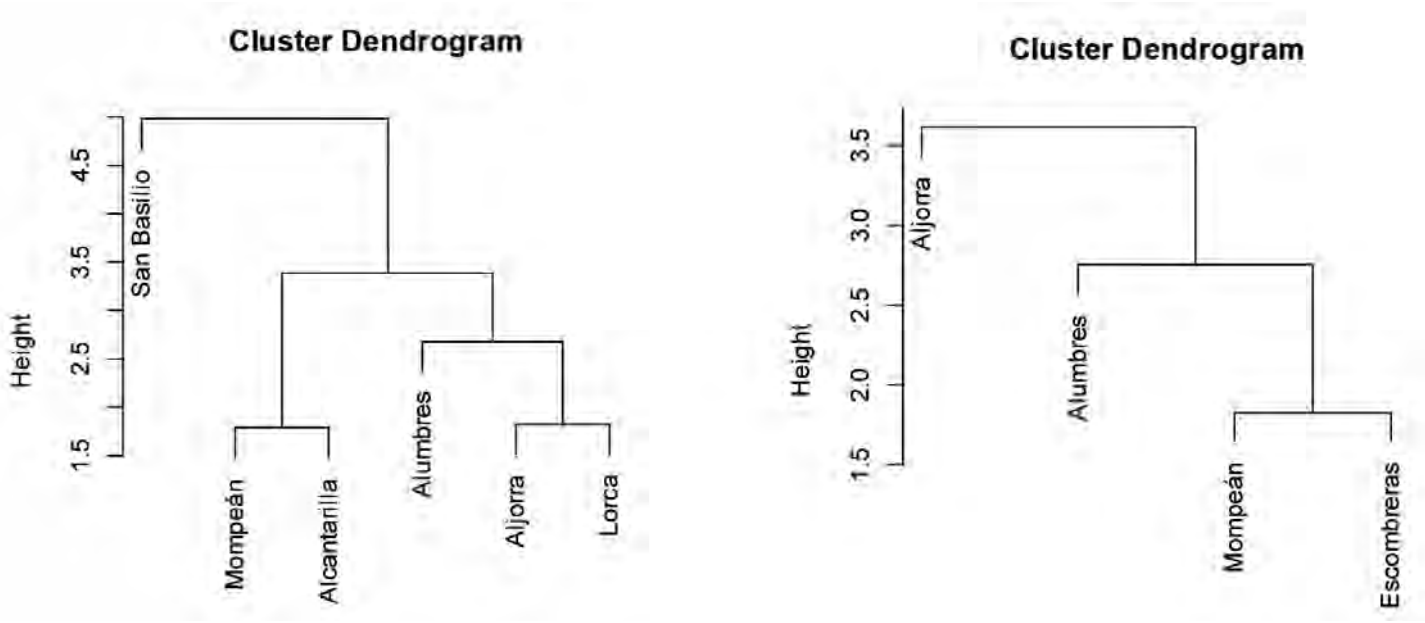


Fig. 4: Dendrograma Cluster del Estudio 1 (a) y del Estudio 2 (b)

estaciones que se encuentran muy contrapuestas. Si comparamos las estaciones con las concentraciones de los contaminantes podemos observar que Alumbres y Valle de Escombreras tendrán mayores concentraciones de SO_2 mientras que Aljorra destaca por valores muy grandes de PM_{10}. Por otro lado, Mompeán tendrá valores elevados de concentración de NO y NO_2.

3.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CLUSTER

3.3.1. Estudio 1

En el dendrograma de la Figura 4a se observa que a un nivel de distancia reescalada mayor se advierten 2 grupos diferenciados, mientras que a un nivel de distancia menor se advierten 3 grupos.

El dendrograma se corresponde con la primera componente principal mostrada en el análisis de componentes principales, donde San Basilio aparece en un grupo aparte, principalmente por su elevada ratio entre concentraciones de óxidos de nitrógeno frente a O_3 comparada con el resto. A medida que nos desplazamos a la derecha en el dendrograma esta ratio va disminuyendo.

3.3.2. Estudio 2

Con los datos del Estudio 2 se obtiene el dendrograma de la Figura 4b. El número de clusters seleccionados en este caso estará entre 2 y 3. Como puede observarse, Escombreras y Mompeán se separan por un lado, Aljorra por otro, y Alumbres quedaría en medio de esos dos grupos aunque en la misma rama que Mompeán y Escombreras.

4. DISCUSIÓN

Como puede verse en las Figuras 2b y 3b, las estaciones de la RVCARM en su conjunto y las del campo de Cartagena, según las dos primeras componentes principales, están relativamente dispersas. No existen grupos de estaciones demasiado cercanas en el gráfico en ningún caso. Esto es indicativo de que, a pesar de haber estaciones que están bastante cerca geográficamente, no presentan las mismas características en cuanto a concentración de contaminantes, con lo que se descartaría la sospecha de que podría haber redundancia o exceso de estaciones de medición en estas zonas.

El número de estaciones consideradas en este análisis (7) coincide con el número total de estaciones que se desprende del Real Decreto 102/2011 en función del número de habitantes de cada zona; no obstante, cabe recordar que la estación de Caravaca no ha sido tenida en cuenta en el análisis. Esto es, la RVCARM tiene una estación más que las exigidas en la legislación. Un análisis más completo requeriría disponer de datos de SO_2 en Caravaca de modo que se pudiera tener en cuenta esta estación en los análisis y comprobar si sus datos son redundantes o no con los de alguna otra estación de la red. En cualquier caso, el requisito poblacional que establece cuántas estaciones deben instalarse en una zona o aglomeración debe complementarse con otros criterios que contemplen, entre otros, la elevada presencia de tejido industrial o turístico en una determinada área. Así, por ejemplo, en la zona del Valle de Escombreras de acuerdo con la legislación solo es necesaria una estación de medida; sin embargo, el ACP revela que las medidas realizadas en Alumbres y el Valle de Escombreras son complementarias y no redundantes.

Tanto para los datos del Estudio 1 como los del 2, se observa que los contaminantes medidos tienen procedencias diferentes, a excepción del NO y el NO_2, que aparecen relativamente próximos en las gráficas de ACP. Estas dos especies proceden del tráfico principalmente y, aunque el compuesto emitido en mayor proporción es el NO, se oxida rápidamente a NO_2 en contacto con el aire. En relación al SO_2, si bien parte procede del tráfico, puede así mismo emitirse en instalaciones industriales en donde haya procesos de combustión de combustibles convencionales. Tal es el caso de la zona del Valle de Escombreras, en donde aparte de otras importantes industrias químicas, se encuentra una de las refinerías de petróleo más grandes del país, y presenta las mayores concentraciones medias de SO_2 en la Región. La fracción PM_{10} es emitida en parte por el tráfico rodado, pero también tiene una importante componente de origen natural, como las típicas intrusiones de polvo sahariano que afectan a esta región cada cierto tiempo. Por último, el O_3 es un contaminante secundario con dinámicas de formación totalmente diferentes del resto de contaminantes medidos.

Según se vio en el estudio 1, la PC1 contrapone al O_3 con los óxidos de nitrógeno, lo cual es esperable dado que el primero se forma a partir de los segundos.

El AC, por su parte, ha revelado que las estaciones del Estudio 1 pueden agruparse en tres grandes grupos, uno de ellos formado exclusivamente por la estación de San Basilio, otro por Mompeán y Alcantarilla, y el tercero por Alumbres, Aljorra y Lorca, según el balance NO_2 / O_3 comentado anteriormente. En relación al Estudio 2, se observan entre dos y tres grupos, en este caso según el balance NO_2 / PM_{10}. Por un lado, aparece Aljorra, por otro Mompeán y Escombreras, y entre ambos, Alumbres. Si bien las estaciones dentro de cada grupo tienen características similares, el análisis ACP ha revelado que en ningún caso existen redundancias entre estaciones.

5. CONCLUSIONES

Tras aplicar los métodos ACP y AC, se deduce que no existe redundancia en la información proporcionada por las estaciones estudiadas, de modo que todas ellas son necesarias para la correcta caracterización de la calidad del aire de la Región de Murcia. Este hecho pone de manifiesto que, aunque a la zona del Valle de Escombreras solo le corresponda por ley una estación de medida (en función del número de habitantes) es preciso considerar otros factores como la presencia de un importante tejido industrial en la zona. Puede concluirse, por tanto, que, en ocasiones, el número de estaciones de vigilancia especificadas en la legislación puede ser insuficiente para caracterizar completamente la calidad del aire de una zona.

Así mismo, el ACP ha revelado que, a excepción del NO y NO_2, que comparten las mismas fuentes de emisión, la procedencia de cada uno del resto de contaminantes es diversa, de modo que no existen agrupaciones de los mismos en base a esto. Así pues, puede concluirse que, aparte de ser obligatoria, es necesaria la medida de todos y cada uno de los contaminantes que en la actualidad se miden en la Región para poder caracterizar con precisión su calidad del aire.

Cabe destacar que sería muy interesante la realización de un nuevo estudio en donde se evalúen las posibles redundancias en las estaciones en función de la época del año, de modo que se tomen en consideración parámetros meteorológicos que podrían influir en los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

[1] Gratani L, Crescente MF, Varone L. "Long-term monitoring of metal pollution by urban trees". Atmos. Environ. 2008. Vol.42-35 p.8273–8277. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.032

[2] Juda-Rezler K., Reizer M., Oudinet JP. "Determination and analysis of PM10 source apportionment during episodes of air pollution in Central Eastern European urban areas: The case of wintertime 2006". Atmos. Environ. 2011. Vol.45-36 p.6557–6566. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.020

[3] Slezakova K., Pires JCM, Castro D. et al. "PAH air pollution at a Portuguese urban area: Carcinogenic risks and sources identification". Environ. Sci. Pollut. Res. 2013. Vol.20-6 p.3932–3945. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-012-1300-7

[4] Vellingiri K., Kim KH, Jeon JY, et al. "Changes in NOx and O3 concentrations over a decade at a central urban area of Seoul, Korea". Atmos. Environ. 2015. Vol.112 p.116–125. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.032

[5] Fang GC, Chiang HC, Hsu CY, et al. "Characteristics of Concentrations and Metal Compositions for PM2.5 and PM2.5–10 in Yunlin County, Taiwan during Air Quality Deterioration". Aerosol Air Qual. Res. 2015. Vol.15-7 p.2571–2583. DOI: https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.04.0261

[6] Pires JCM, Sousa SIV, Pereira MC, et al. "Management of air quality monitoring using principal component and cluster analysis-Part I: SO2 and PM10". Atmos. Environ. 2008. Vol.42-5 p.1249–1260. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.044

[7] Pires JCM, Sousa SIV, Pereira MC, et al. "Management of air quality monitoring using principal component and cluster analysis-Part II: CO, NO2 and O3". Atmos. Environ. 2008. Vol.42-5 p.1261–1274. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.041

[8] Pires JCM, Pereira MC, Alvim-Ferraz MCM, et al. "Identification of redundant air quality measurements through the use of principal component analysis". Atmos. Environ. 2009. Vol.43-25 p.3837–3842. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.05.013

[9] Lu WZ, Di He H, yun Dong L. "Performance assessment of air quality monitoring networks using principal component analysis and cluster analysis". Build. Environ. 2011. Vol.46-3 p.577–583. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.004

[10] Zhao L, Xie Y, Wang J, et al. "A performance assessment and adjustment program for air quality monitoring networks in Shanghai". Atmos. Environ. 2015. Vol.122 p.382–392. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.069

[11] Wang C, Zhao L, Sun W, et al. "Identifying redundant monitoring stations in an air quality monitoring network". Atmos. Environ. 2018. Vol.190 p.256–268. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.040

[12] Caggiano R, Di Leo S, D'Emilio M, et al. "Statistical tools for data optimization in air quality monitoring networks". Fresenius Environ. Bull. 2007. Vol.16 p.364–371.

[13] Ibarra-Berastegi G, Sáenz J, Ezcurra A, et al. "Assessing spatial variability of SO2 field as detected by an air quality network using Self-Organizing Maps, cluster, and Principal Component Analysis". Atmos. Environ. 2009. Vol.43 p.3829–3836. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.05.010

[14] Dominick D, Juahir H, Latif MT, et al. "Spatial assessment of air quality patterns in Malaysia using multivariate analysis". Atmos. Environ. 2012. Vol.60 p.172–181. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.021

[15] Gómez-Losada A, Lozano-García A, Pino-Mejías R, et al. "Finite mixture models to characterize and refine air quality monitoring networks". Sci. Total Environ. 2014. Vol.485–486 p.292–299. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.091

[16] CARM. La calidad del aire en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Informe anual 2014. Disponible en Web: <https://sinqlair.carm.es/calidadaire/documentos/documentacion/Informeanual_2014.pdf>

[17] R Core Team, "R: A Language and Environment for Statistical Computing." Vienna, Austria, 2014. Disponible en Web: <http://www.R-project.org/>

[18] I. T. Jolliffe, Principal component analysis. 2ª edición. Springer Series in Statistics. Nueva York: Springer, 1986. 271p. ISBN: 978-1-4757-1906-2.

[19] R. B. Cattell. "The Scree Test For The Number Of Factors". Multivariate Behav. Res. 1966. Vol.1-2 p.245–276. DOI: https://doi.org/10.1207/s15327906mbr0102_10

[20] S. D. Wilks. Statistical Methods In The Atmospheric Sciences. 3ª edición. International Geophysics Series. Vol.59. Burlington: Elsevier Academic Press, 2006. 704p. ISBN: 978-0-1238-5022-5

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna-com/documentos/pdfs/_adic/9250-1

Enfoque práctico en la enseñanza del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) en un curso de termodinámica aplicada

A practical approach for teaching the Organic Rankine Cycle (ORC) in an advanced thermodynamics course

Adrián Mota-Babiloni, Joaquín Navarro-Esbrí, Francisco Molés Ribera y Carlos Mateu Royo
Universitat Jaume I (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9211

1. INTRODUCCIÓN

Los cursos de termodinámica son necesarios para que los ingenieros entiendan cómo se transfiere la energía [1]. Los conceptos comunes enseñados y practicados en cada curso de termodinámica incluyen ciclos termodinámicos básicos. A continuación de esto, los estudiantes de ingeniería pueden profundizar en las diferentes ramas de la termodinámica aplicada, para estar preparados para trabajar en procesos industriales, instalaciones de energía renovable, sistemas de producción de calor y frío, y plantas de calor y energía combinados (CHP), entre muchas otras. Según la Asociación Europea de Universidades (EUA), las universidades tienen un papel fundamental que desempeñar como actores clave en la energía, por lo que se combinan diferentes tecnologías, sistemas, economías y mercados energéticos, entre otros, para resolver los desafíos existentes de manera integral [2].

Una tecnología que se está volviendo relevante en los últimos años en el campo de la generación de energía sostenible es el ciclo orgánico de Rankine (ORC), que puede aumentar la eficiencia global de diferentes sectores industriales y de energías renovables. Su funcionamiento es como el de un ciclo típico de Rankine, pero en lugar de usar agua, usa un fluido orgánico con temperatura crítica más baja para usarse a temperaturas menores, donde la mayoría del calor residual industrial puede reutilizarse en procesos de cogeneración [3]and the selection of the optimal conversion technology and size, are highly influenced by the typology of energy demand (load-duration curve, temperature of heat demand, heat and electricity load patterns. Hasta la fecha, en la literatura se pueden encontrar varios ejemplos de métodos exitosos de enseñanza del ciclo clásico de Rankine en instituciones de educación superior. La mayoría de ellos incluyen simuladores robustos porque pueden desarrollarse para la enseñanza de la termodinámica aplicada para analizar diferentes configuraciones y condiciones de operación de manera simple, y responder a la necesidad de un análisis rápido de datos y rendimiento del sistema [4].

Se debe considerar la práctica real de estos conceptos mostrados en teoría y practicados con software para alcanzar una comprensión más profunda de los conceptos. Kandpaland Broman [5] incluye entre sus recomendaciones fortalecer los programas de educación sobre energías renovables la introducción de capacitación práctica para los estudiantes, por ejemplo, mediante la realización de sesiones de laboratorio o visitas a sistemas de trabajo reales. Bornasal et al. [6] llegó a la conclusión de que el proceso de planteamiento y resolución de problemas es importante para absorber nuevos conceptos para que el proceso de aprendizaje siga un marco de crecimiento conceptual que pueda replicarse en los cursos.

Sin embargo, los sistemas ORC pueden aplicarse a aplicaciones a pequeña escala y, por lo tanto, ofrecen una solución para estudiar una nueva aplicación de energía sostenible en las universidades. Meyer et al. [7] mostró el proceso de diseño requerido para la construcción de una banco de pruebas de ORC a pequeña escala y destacó problemas con la selección del producto, la adquisición y el ensamblaje de la máquina. De este modo, Bonk et al. [8] propuso y diseñó un banco de pruebas ORC de 1 kW para fines educativos y de investigación, pero en este momento no hay resultados sobre la implementación exitosa de ambas aplicaciones.

Debido a la notoriedad de los sistemas ORC en los últimos años como una forma de producir electricidad sostenible [9] y que su tamaño es adecuado para laboratorios, su introducción en sesiones prácticas de estudios de ingeniería puede ser exitosa para trabajar conceptos termodinámicos y ampliar el conocimiento de ORC. La recuperación del calor residual será muy relevante para alcanzar una descarbonización del sector industrial y la producción de electricidad verde. A pesar de que la tecnología se ha investigado intensamente durante los últimos años, y se pueden encontrar muchos casos exitosos y proveedores de tecnología, aún es difícil encontrarla en comparación con otras tecnologías bien establecidas como los paneles fotovoltaicos. Este trabajo presenta cómo se puede introducir una sesión de laboratorio utilizando un módulo ORC comercial y resolución de problemas reales y los conceptos principales a considerar en el desarrollo de una sesión de laboratorio con diferentes partes y enfoques. Las principales tareas realizadas por los estudiantes, y los resultados y resultados de esta actividad educativa han sido definidos y justificados. Esta sesión tiene un gran potencial de réplica en muchos cursos universitarios de termodinámica aplicada y procesos industriales y se convierte en una actividad de aprendizaje común puesto que un número significativo de instituciones de educación superior han desarrollado o comprado plataformas de prueba ORC para investigación que pueden adaptarse para la enseñanza.

2. EL CICLO ORGÁNICO DE RANKINE (ORC)

2.1. EL CICLO ORC

El sistema ORC utiliza una fuente de temperatura más alta para producir energía mecánica y rechazar el calor a fuentes de temperatura más bajas. Su funcionamiento básico sigue los principios del ciclo de Rankine y, por lo tanto, presenta los mismos componentes, y el fluido de trabajo (también conocido como refrigerante) sigue los mismos procesos (Fig. 1). Los

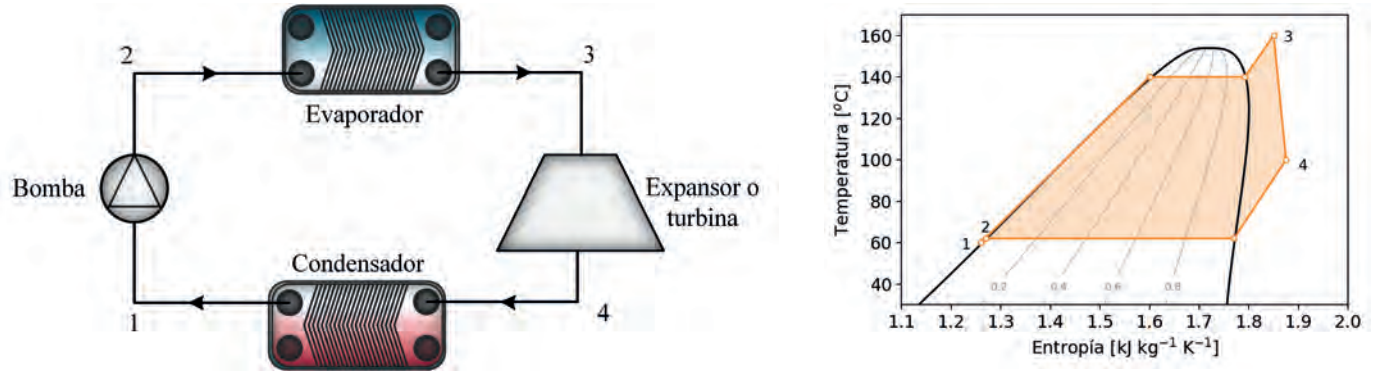


Figura 1: Esquema ORC básico y su funcionamiento en un diagrama Ts (utilizando HFC-245fa)

ciclos ORC (tanto en un ciclo combinado como independientes) parecen ser rentables en caso de demanda de calor a baja temperatura. De lo contrario, se requiere un ORC flexible para satisfacer la demanda de calor. Para los usuarios industriales, una configuración más simple sin ORC puede ser más competitiva que una ORC flexible, en función de los costos iniciales, la tasa de descuento y las tarifas de alimentación.

Desde el punto 1, el líquido saturado / subenfriado se presuriza usando una bomba, típicamente de tipo diafragma. Luego, el nivel térmico del fluido de trabajo aumenta al usar un evaporador, en el cual el calor se intercambia típicamente usando calor residual o fuentes renovables. Allí, el fluido de trabajo se calienta primero en fase líquida hasta alcanzar la temperatura de saturación a la presión correspondiente, luego se evapora y, en la parte final del evaporador, este fluido de trabajo, en fase gaseosa, se sobrecalienta para tener una expansión en seco. Luego, el fluido de trabajo se expande, y allí la energía del fluido se convierte en energía mecánica. Una gran parte de ella se convierte en energía eléctrica que se puede usar para autoconsumo, o se puede inyectar en la red eléctrica. Finalmente, este ciclo termodinámico se cierra condensando el fluido de trabajo, después de desrecalentarlo. Aunque el calor rechazado por el condensador puede ser disipado al ambiente, es preferible usarlo en otro proceso que pueda reutilizar este calor residual de baja temperatura. Se calcula la eficiencia térmica de los ciclos de ORC, dividiendo la potencia de salida generada por el calor de entrada (Ecuación (1)), de la misma manera que los ciclos de Rankine convencionales.

$$\eta_{term} = \frac{\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba}}{\dot{Q}_{evap}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (1)$$

Se han propuesto diferentes arquitecturas de ORC para mejorar la eficiencia del sistema (mayor potencia de salida de ORC para la misma entrada de calor) por diferentes métodos. Sin embargo, para ser técnicamente factible y requerir un mantenimiento mínimo y reducir los problemas operativos, su complejidad debe ser limitada. De esta manera, la configuración regenerativa (Fig. A.1) se destaca porque tiene beneficios energéticos y operativos con la única adición de un intercambiador de calor adicional, el regenerador (también llamado recuperador).

2.2. FLUIDOS DE TRABAJO PARA ORC

El fluido de trabajo ORC más extendido es el HFC-245fa (HFC: HydroFluoroCarbon) por su punto crítico adecuado para ofrecer un alto rendimiento para este tipo de aplicaciones, potencial de agotamiento de ozono (PAO) cero, pendiente seca, alta densidad de vapor, alto calor latente, y presiones moderadas, entre otros. El principal problema es su valor relativamente alto de potencial de calentamiento atmosférico (PCA) (858). Además de los muchos beneficios que ofrecen los refrigerantes naturales, los HFO (HFO: HydroFluoroOlefin) y HCFO (HCFO: HydroChloroFluoroOlefin) parecen ser candidatos prometedores para reemplazar el HFC-245fa en las instalaciones existentes. La Tabla A.1 (incluida en el Apéndice) muestra las principales propiedades del HFC-245fa, y dos candidatos, HCFO-1223zd(Z) y HFO-1336mzz-Z, cuyo beneficio principal en comparación con el HFC-245fa es el muy bajo valor de PCA, aproximadamente 1.

3. SESIÓN DE LABORATORIO CON ORC

3.1. EL CURSO SELECCIONADO PARA IMPLEMENTAR LA SESIÓN

El curso seleccionado para presentar la sesión de laboratorio de ORC es "Gestión energética en plantas industriales", incluido en el segundo semestre de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica. Se compone de 45 horas presenciales de clase y 67.5 horas de trabajo personal (4.5 ECTS, Sistema Europeo de Transferencia y Acumulación de Créditos), y la estructura seguida por esta se muestra en la Fig. A.2.

El objetivo del curso es satisfacer la creciente demanda de soluciones de eficiencia energética en el sector industrial, centrándose en la necesidad de una gestión eficiente de los recursos energéticos. Por lo tanto, este curso está destinado a ofrecer conocimientos técnicos y herramientas para auditar y mejorar la eficiencia energética de diferentes tipos de plantas industriales, así como para implementar medidas de ahorro de energía. Las sesiones de laboratorio tienen el propósito de poner en contacto a los estudiantes con los aspectos prácticos de los conceptos principales vistos en las sesiones de teoría a través de diferentes métodos, como la práctica de laboratorio o la visita a instalaciones reales.

3.2. ESTRUCTURA DE LA SESIÓN DE LABORATORIO

La duración de la sesión de laboratorio es de 2 horas y 30 minutos, se compone de tres partes principales, el número máximo recomendado de estudiantes es de 10 y el profesor debe tener experiencia en sistemas ORC. La sesión comienza con una introducción a la tecnología, su rango de temperaturas y potencia, sus principales aplicaciones y sus principales diferencias en comparación con otras tecnologías de recuperación de calor residual. Luego, se comentan los componentes principales (y las especificaciones típicamente requeridas), arquitecturas y fluidos de trabajo, especificando su efecto sobre el medio ambiente y el cambio climático.

Después de eso, los estudiantes son llevados a laboratorio con el módulo ORC y examinan la posición de los componentes, y el profesor explica la función de otros componentes adicionales necesarios para la seguridad o el funcionamiento correcto. El profesor activa el módulo ORC y se establecen algunas condiciones arbitrarias. Los estudiantes observan la evo-

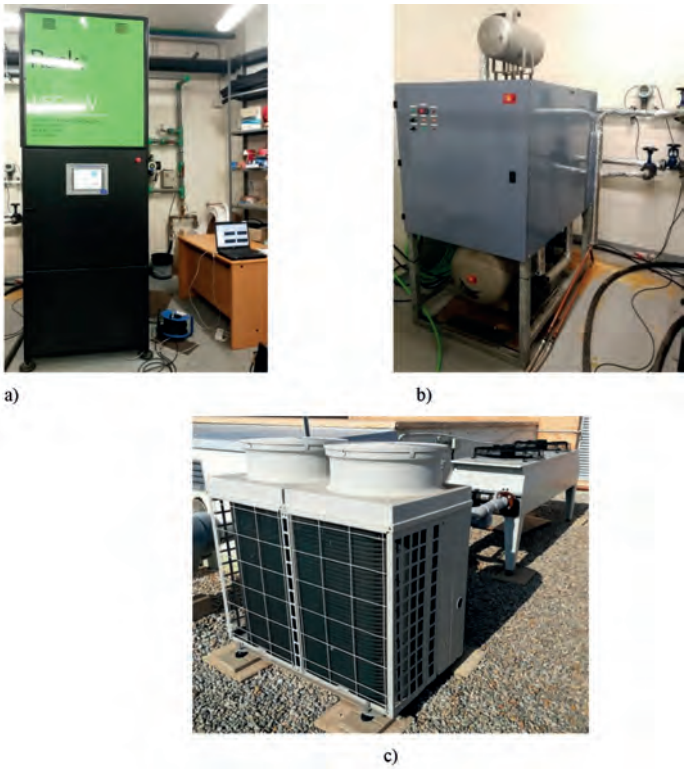


Figura 2: a) Módulo ORC comercial, b) caldera y anillo de aceite, y c) enfriadora refrigerada por aire utilizada para la sesión de laboratorio

lución de los parámetros medidos en una pantalla hasta que alcanza condiciones de estado estacionario. Luego, se selecciona otra condición arbitraria, y cuando alcanza un estado estable, comparan los parámetros medidos con la situación anterior para analizar el efecto de las condiciones de entrada en el ORC y la generación de electricidad.

Finalmente, los estudiantes resuelven un problema relacionado con una situación típica, tomando datos de una situación de caso real y discutiendo con el profesor sobre los resultados. Deben entregar al profesor los cálculos realizados y las conclusiones de los resultados a evaluar.

4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La configuración experimental utilizada en la sesión de laboratorio es un módulo ORC comercial de salida de potencia nominal de 1,5 kW basado en una configuración regenerativa y diseñado inicialmente para usarse con el fluido de trabajo HFC-245fa (Fig.2). La aplicación principal del módulo ORC utilizado es el CHP a pequeña escala, y las temperaturas de fuente y disipador de calor corresponden a las de fuentes de calor de baja calidad.

Los componentes principales del módulo ORC son expansores basados en tecnología volumétrica (scroll), intercambiadores de calor de placas soldadas y configuración regenerativa. Las condiciones de funcionamiento están establecidas por dos circuitos secundarios, uno compuesto por una caldera donde un aceite térmico bombeado continuamente se calienta mediante un conjunto de resistencias y simula los desechos o calor renovable útil, y otro que intercambia calor con agua en el condensador a temperaturas más bajas y lleva el calor a un enfriador enfriado por aire. La temperatura máxima de entrada del aceite térmico es de 160 °C y la temperatura máxima de entrada del agua de enfriamiento es de 45 °C.

El módulo ORC cuenta con una serie de sensores para labores de investigación (Tabla 1), y este conjunto de sensores también se usará para mostrar a los estudiantes los parámetros de funcionamiento del fluido de trabajo (temperatura y presión) que determina el estado termodinámico del mismo en cada punto del circuito. El caudal másico del fluido de trabajo y el caudal volumétrico de los fluidos secundarios también se recogen, así como la energía eléctrica generada por el expansor y la consumida por la bomba de refrigerante. Todas las mediciones, reunidas cada segundo, se muestran continuamente en una pantalla, y las mediciones se pueden registrar para su posterior análisis.

Se les pide a los estudiantes que calculen los parámetros que se muestran en la Tabla 2, donde también se pueden mostrar las fórmulas requeridas.

Parámetro medido	Sensor	Incertidumbre
Temperaturas	Termopares tipo K	±0.5 °C
Presiones	Transductores de presión piezoeléctricos	±0.5 kPa
Caudalímetro másico fluido de trabajo	Caudalímetro Coriolis	±0.3%
Potencia eléctrica	Vatímetro digital	±1.55%
Caudalímetro volumétrico aceite térmico	Caudalímetro vortex	±0.028 m^3/h
Caudalímetro volumétrico agua	Caudalímetro electromagnético	±0.5%

Tabla 1: Parámetros medidos, instrumentos de medición e incertidumbre asociada

Parámetro	Fórmula	Unidades
Potencia eléctrica de salida neta ($\dot{W}$)	Medido directamente	kW_e
Calor transferido en la fuente de calor ($\dot{Q}_{evap}$)	$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$	kW_{th}
Calor transferido en la disipación ($\dot{Q}_{cond}$)	$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$	kW_{th}
Eficiencia eléctrica (η_{el})	$\eta_{el} = \dot{W} / \dot{Q}_{evap}$	%
Eficiencia térmica (η_{term})	$\eta_{term} = \dot{Q}_{cond} / \dot{Q}_{evap}$	%
Eficiencia global (η_{global})	$\eta_{global} = \eta_{el} + \eta_{term}$	%

Tabla 2: Parámetros calculados en la caracterización del sistema ORC

5. CASO DE ESTUDIO

El caso propuesto es la revalorización del calor residual aprovechando los gases de escape de un motor de gas natural instalado en un sistema de cogeneración de una planta de tratamiento de aguas residuales. Las características del motor se dan en la Tabla 3.

La propuesta especifica que el proyecto de recuperación de calor residual incluye un intercambiador de calor de gas / aceite térmico, un circuito de aceite térmico y una máquina ORC (Fig. 3). Además de la electricidad producida por la máquina ORC, también se utilizará el calor intercambiado en el condensador para el proceso de digestión anaeróbica en la planta de tratamiento de aguas residuales, a temperaturas entre 55 y 60 °C, para que el ORC se use para CHP. La producción de electricidad del ORC también es dada por el profesor, como se muestra en la Fig. 3.

Se les pide a los estudiantes que determinen:

- la potencia térmica disponible de los gases de escape del motor de gas natural (522 kW);
- las condiciones de funcionamiento del módulo ORC comercial (transferencia de calor de fuente de calor de 330 kW, temperatura de salida de gas de escape de 303 °C);



Electricidad generada por el ORC (kW)		Temperatura de condensación (°C)		
		65	55	45
Temperatura de evaporación (°C)	210	315	330	No aplica
	200	330	300	285
	190	305	285	265
	180	No aplica	265	245

Figura 3: Esquema y condiciones del proyecto propuesto a los estudiantes

Parámetro	Valor
Eficiencia eléctrica	40.16%
Temperatura de gases de salida	515 °C
Caudal másico de los gases de salida	5500 kg·h^{-1}

Tabla 3: Valores del motor del caso propuesto

- y el período de recuperación de la inversión, considerando que el módulo ORC está operando 8000 horas por año, el coste de inversión es de 100000 € y el precio de la electricidad es de 15 c€ por kWh (beneficio anual de 42000 € y un período de recuperación de 2,38 años).

6. RESULTADOS

Los estudiantes tienen una reacción adecuada a esta sesión completa de laboratorio, y obtuvieron los resultados antes de terminar la sesión. Este hecho fue favorecido debido al grupo reducido y la experiencia del profesor que sabía qué aspectos del módulo ORC deben destacarse durante la sesión de laboratorio. En el cuestionario de opinión final completado por los estudiantes, de 1 (satisfacción más baja) a 5 (satisfacción más alta), los valores promedio para las respuestas se obtuvieron entre 3.6 y 4, lo que resultó en la satisfacción más alta con las habilidades que poseen el profesor y el potencial de aplicación de ORC para detener el cambio climático.

Los estudiantes estaban interesados y se les preguntó acerca de la utilización real de esta nueva tecnología y en qué campo se puede encontrar más comúnmente. Además, preguntaron sobre los problemas típicos de diseño y operación que se ven en las máquinas en funcionamiento, y qué tecnologías son los principales competidores para la generación a pequeña escala de electricidad a partir de desechos o calor renovable.

Esta sesión de laboratorio fue útil para que los estudiantes recordaran principalmente los conceptos vistos en los cursos básicos de termodinámica y transferencia de calor. Además, se combinaron conceptos muy diferentes como estrategias de diseño de intercambiadores de calor, eficiencias del motor, expansión seca, propagación de incertidumbre o viabilidad económica para resolver los problemas propuestos.

7. CONCLUSIONES

Los nuevos desafíos ambientales requieren ingenieros bien preparados, conscientes de las nuevas soluciones disponibles en el mercado. Los cursos de termodinámica aplicada ofrecen una excelente oportunidad para introducir este tipo de tecnologías, como el ORC. Este documento presenta la metodología y los resultados de una sesión de laboratorio ORC diseñada para estudiantes de ingenierías.

Los principios operativos de ORC, las aplicaciones principales, las configuraciones y los fluidos de trabajo han sido expuestos y pueden usarse para el conocimiento básico requerido. Los mismos conceptos deben transmitirse a los estudiantes antes de comenzar la parte práctica de la sesión. El ORC utilizado en esta sesión es un módulo comercial en el que se han probado fluidos de trabajo nuevos y ecológicos. La presencia de este módulo ofrece una solución rápida y económica para la sesión de laboratorio. Los estudiantes han realizado una prueba real y han observado cuáles son los principales parámetros utilizados para controlar su funcionamiento. A partir de eso, han calculado algunos parámetros de energía relevantes para caracterizar el módulo ORC. Finalmente, a partir de un caso propuesto que utiliza datos de una aplicación real (calor residual disponible en los gases de escape de un motor de cogeneración), los estudiantes seleccionaron una solución ORC y calcularon la viabilidad económica de la misma.

La satisfacción de los estudiantes ha sido destacable, y la aplicación de este tipo de prácticas se recomienda para cursos avanzados de diferentes tipos de ingeniería o máster. Si no hay un módulo ORC disponible en la universidad, se pueden recuperar datos experimentales de la literatura, o se puede construir un sistema micro ORC.

REFERENCIAS

[1] Ahlström P, Aim K, Dohrn R, Elliott JR, Jackson G, Jaubert JN, et al. A survey of the role of thermodynamics and transport properties in ChE university education in Europe and the USA. Chem Eng Educ 2010.
[2] European University Association. Energy Transition and the Future of Energy Research, Innovation and Education: An Action Agenda for European Universities. Brussels, Belgium: 2017.
[3] Pantaleo AM, Ciliberti P, Camporeale S, Shah N. Thermo-economic Assessment of Small Scale Biomass CHP: Steam Turbines vs ORC in Different Energy Demand Segments. Energy Procedia, 2015. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.381.
[4] Belman-Flores JM, Barroso-Maldonado JM, Mendez-Díaz S, Martínez-Martínez S. Virtual test bench as a complement to study thermal area: Application in vapor compression systems. Rev Fac Ing 2015. https://doi.org/10.17533/udea.redin.n77a08.
[5] Kandpal TC, Broman L. Renewable energy education: A global status review. Renew Sustain Energy Rev 2014. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.039.
[6] Bornasal F, Brown S, Perova-Mello N, Beddoes K. Conceptual Growth in Engineering Practice. J Eng Educ 2018;107:318–48. https://doi.org/10.1002/jee.20196.
[7] Meyer D, Wong C, Engel F, Krumdieck S. Design and Build of a 1 kilowatt Organic Rankine Cycle Power Generator. 35th New Zeal Geotherm Work 2013 Proc 2013.
[8] Bonk CD, Laux C, Rödder M, Neef M. Design of a 1 KW Organic Rankine Cycle for Teaching and Research Issues. Energy Procedia, 2017. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.117.
[9] Imran M, Haglind F, Asim M, Zeb Alvi J. Recent research trends in organic Rankine cycle technology: A bibliometric approach. Renew Sustain Energy Rev 2018. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.028.
[10] Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden MO. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program 2018. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18434/T4JS3C.

AGRADECIMIENTOS

La Universitat Jaume I ha financiado esta investigación a través del "Apoyo a la innovación educativa para el año académico 2017/18" (3411), "Ayudas complementarias para proyectos de innovación educativa de nuevos grupos para el año académico 2017/18" (3411/17). Adrián Mota-Babiloni desea agradecer el apoyo financiero del Gobierno español en virtud de las "Ayudas Juan de la Cierva-Formación 2016" (referencia FJCI-2016-28324).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9211-1.pdf

Cod. 9602 | Ingeniería y tecnología del medio ambiente | 3308.02 Residuos industriales

Evaluación de la utilización de escorias siderúrgicas bof para la preparación superficial de materiales por abrasión

Evaluation of the use of bof slags for preparing surface by blasting

Marina Díaz-Piloñeta , Francisco Ortega-Fernández , José-Manuel Mesa-Fernández y Henar Morán-Palacios

Universidad de Oviedo (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9602

El sistema productivo actual se encuentra en crisis frente a los avances de una sociedad que cada vez desarrolla una mayor conciencia y sensibilidad ante los problemas medioambientales. El modelo de producción lineal basado en "tomar-fabricar-consumir-eliminar" es agresivo con el medio y las estimaciones muestran que continuando en esta línea no tardarán en agotarse las fuentes de suministro, tanto materiales como energéticas. Además, tiene una fuerte dependencia de las materias primas, lo que conlleva un riesgo asociado al suministro, precios elevados y con mucha volatilidad, así como una reducción significativa del capital natural.

Como consecuencia, los países desarrollados están adoptando políticas para promover un cambio hacia la denominada economía circular [1]. La economía circular busca maximizar los recursos disponibles, tanto materiales como energéticos, para que permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo productivo y aspira a reducir al máximo la generación de residuos y aprovechar eficientemente aquellos cuya generación no se haya podido evitar. Pretende, por tanto, desvincular el crecimiento económico del consumo finito de recursos.

Concretamente, en la industria siderúrgica se generan una gran cantidad de residuos de forma inherente al proceso productivo. De todos estos residuos, los más importantes en términos de volumen de producción son las escorias (90%). A nivel mundial, estos residuos representan más de 400 millones de toneladas al año [2]. Solo en Europa se generan de media anualmente 45 millones de toneladas de escorias, lo que supone un verdadero reto para la economía circular [3]. Las escorias son residuos sólidos compuestos principalmente de sílice, óxido de calcio, óxido de magnesio y óxidos de aluminio y hierro. En función del tipo de proceso se generan tres tipos principales de escoria: escoria de horno alto (Blast Furnace, en adelante BF), escoria de acería, generalmente denominada BOF (Basic Oxygen Furnace) o LD por ser generada en el convertidor de acero mediante el proceso de Linz-Donawitz y escoria de horno de arco eléctrico, conocida como EAF (Electric Arc Furnace) [4]. Aunque todas se generan en grandes cantidades, el mayor problema de almacenamiento está asociado a la BF y la BOF. Por cada tonelada de acero se producen entre 130 y 100 kg de acuerdo con la composición y proceso de fabricación del acero [5]cold to cold, de modo que en 2018 se generaron entre 190 y 290 millones de toneladas de escoria en el mundo [6]. Aunque se han hecho esfuerzos por reciclar dicha escoria, por ejemplo, como material en el sector de la construcción, actualmente todavía una parte significativa acaba en el vertedero. En Europa, el porcentaje de utilización de dicha escoria es alrededor del 87 % y en Estados Unidos el 84,4 %, pero en otros países es muy inferior, como es el caso de China donde ronda el 30 % [7].

En la búsqueda de soluciones es preciso incidir en aquellas aplicaciones finales que consuman porcentajes significativos de la generación. El campo de la ingeniería civil resulta, por tanto, un candidato idóneo dado que es el que mayor cantidad de áridos y material consume.

Una de las funciones de la ingeniería civil es la construcción de estructuras de materiales muy diversos que tienen que aguantar condiciones en entornos hostiles de trabajo. La preparación inicial de las superficies, eliminando todo resto de suciedad o corrosión y dotándolas de una rugosidad adecuada [8], es una tarea vital para proteger la superficie mediante el recubrimiento con algún tipo de material protector frente a la degradación de la corrosión, la fatiga y el desgaste. El método más utilizado para ello es el chorreado superficial, que consiste en propulsar una corriente de material abrasivo disperso en un medio (líquido o gas) contra una superficie a alta presión. Además, también es adecuado para eliminar la corrosión y otros residuos en algunas industrias y estructuras civiles, mejorar la apariencia física de determinados componentes, eliminar rebabas, etc. Debido a ello, esta tecnología tiene cabida en multitud de sectores constructivos e industriales, como son, entre otros, el sector aeronáutico, la automoción, la energía eólica o la industria ferroviaria.

Actualmente esta operación se realiza con abrasivos tradicionales, como la arena de sílice o granalla metálica, lo que requiere la producción de material y consumo de recursos. Sin embargo, la escoria puede mejorar la sostenibilidad de las operaciones si se consigue reemplazar estos áridos de nueva producción por escoria residual ya almacenada.

Por tanto, el principal objetivo del presente trabajo es estudiar la posible utilización de las escorias siderúrgicas como abrasivos, así como de analizar las características y propiedades que deben cumplir para su introducción en el sector, minimizando la necesidad de extraer áridos naturales.

1. EL CHORREADO SUPERFICIAL

El chorreado superficial con abrasivos consiste en el impacto de una corriente de abrasivos con alta energía cinética propulsados sobre una superficie, de modo que, mediante la fuerza del impacto, se eliminen los contaminantes superficiales, como se establece en la norma UNE-EN ISO 12944-4 [9], cuyo objetivo fundamental es producir una superficie limpia y libre de todo tipo de suciedad. Las técnicas de chorreado superficial se pueden diferenciar en dos tipos, dependiendo de los materiales requeridos para la aplicación: chorreado superficial en seco y chorrea-

do superficial en húmedo, según indica la norma UNE-EN ISO 8504-2 [10].

Los abrasivos son materiales caracterizados por su alta dureza y capacidad de corte. La mayoría de ellos tienen origen mineral, y son obtenidos directamente de la naturaleza, como la arena, mientras que otros se obtienen mediante procesos químicos. Los parámetros técnicos del proceso, como la eficiencia o la rugosidad, están influenciados por muchos factores [11], como la distancia del dispositivo de pulverización de la superficie de trabajo, el tipo y tamaño de los granos o la presión y el tiempo de tratamiento. Las características más importantes de un abrasivo son su dureza, el tamaño del grano y la estructura afilada de sus bordes. La dureza de las partículas de abrasivo influye directamente en la geometría del corte [12] y la profundidad de penetración depende de la relación entre la dureza del material a tratar y la dureza del abrasivo [13].

Para una correcta utilización, los abrasivos deben estar secos (excepto cuando se agreguen a sistemas de chorreo en húmedo) y deben fluir libremente para circular de manera continua por el chorro de proyección. Los requisitos que deben cumplir vienen reflejados en las normas UNE-EN ISO 11124 [14] y UNE-EN ISO 11126 [15], y han de estar libres de contaminantes corrosivos o que afecten a la adherencia. En la actualidad, están regulados a través de UNE-EN ISO 8504-2:2002 [10] para su uso como abrasivo de chorreado una gran variedad de materiales sólidos, naturales y sintéticos, y varios líquidos. Cada uno de ellos proporciona un rendimiento característico y un acabado superficial determinado.

Básicamente, se diferencian entre metálicos y no metálicos. Los metálicos tienen un coste superior a los no metálicos, pero pueden ser recuperados, lo que incrementa su eficiencia. Sin embargo, el reciclado del producto no es viable en todas las operaciones de chorreado, ya que, por ejemplo, cuando se chorrea al aire libre, el abrasivo se pierde. Por ello, las partículas de abrasivo metálicas se utilizan principalmente en túnel de chorreado, mientras que para chorreo en exterior se prefiere el uso de abrasivos no metálicos. Estos últimos se clasifican de acuerdo con el material de procedencia y su origen o modo de fabricación (natural o sintético).

El abrasivo más comúnmente empleado desde hace décadas es la arena de sílice [16]. El proceso, como norma general, produce una gran cantidad de polvo [17] ya que, durante el chorreado, los gránulos de arena se descomponen en partículas muy pequeñas, de tamaños inferiores a 5 µm y no visibles a simple vista, denominada "fracción respirable", susceptibles de ser inhaladas e incrustadas en los alveolos pulmonares, llegando a causar problemas respiratorios graves como la silicosis pulmonar [18]. Debido a estos problemas, no sólo de salud, sino también de calidad ambiental, en muchos países, como es el caso de Holanda, está comenzando a prohibirse el uso de abrasivos que contengan más de 0,1% de sílice libre. Por este motivo, el uso de la arena de sílice se está sustituyendo progresivamente por otros abrasivos tales como escorias de cobre, granate, olivino, microesferas de vidrio o silicatos de aluminio, entre otros, cuyo uso se considera más seguro.

Los abrasivos sintéticos se obtienen mediante procesos mecánicos, electrónicos o industriales, como subproductos de industrias diversas. Concretamente, la escoria BF resultante del proceso siderúrgico, aparece registrada en la norma UNE-EN ISO 8504-2 [10] como un abrasivo no metálico de origen sintético siendo una alternativa a la arena de sílice para este tipo de operaciones. Los requisitos que ha de cumplir para su uso aparecen reflejados en la norma UNE-EN ISO 11126-6 [19]. La escoria BOF, sin aplicaciones alternativas relevantes, no aparece reflejada en la norma mencionada, pero, en comparación con los abrasivos no metálicos sintéticos contemplados en ella, se observa un gran potencial debido a sus propiedades físicas y químicas. Para poder garantizar su validez como abrasivo de chorreado es necesario el desarrollo de ensayos a escala de laboratorio e industrial, a fin de comprobar su comportamiento en situaciones de trabajo reales.

2. METODOLOGÍA

La evaluación de la utilización de escorias siderúrgicas como material abrasivo en la preparación de superficies se llevó a cabo de la siguiente forma:

- Selección y preparación del material: teniendo en cuenta la necesidad de minimizar el procesamiento del material de partida se seleccionaron para su análisis posterior muestras de los siguientes tipos de escoria:
  1. Escoria BF granulada, todo uno, sin clasificación granulométrica.
  2. Escoria BOF, de la que se distinguen varios casos en función del cribado:
     a. Fracción 0-10mm (BOF-A).
     b. Todo uno, 0,2-2mm obtenida mediante tamizado-trituración-retamizado (BOF-B).
- Ensayos fisicoquímicos: para introducir un nuevo agente abrasivo en el mercado, resulta fundamental confirmar que el mismo cumple con todos los requisitos químicos y físicos establecidos en la normativa para los materiales que actualmente se encuentran normalizados para tal propósito. La norma ISO 11127 [20] se subdivide en siete partes en donde se especifican los ensayos necesarios y la metodología que sebe seguirse para su realización.
- Prueba de aplicación: para comprobar el comportamiento del material en un ambiente de trabajo real, se desarrolló una prueba de rendimiento industrial en una empresa especializada en tratamiento y reparación de superficies, utilizando escoria BOF y escoria BF granulada.

3. ENSAYOS FISICOQUÍMICOS

Las muestras correspondientes a la escoria BOF (Tabla 1) se caracterizaron mediante ensayos fisicoquímicos según se indicó en el apartado anterior para comprobar el cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma UNE-EN ISO 11126 [19].

Composición	% presente Escoria BOF
CaO	48,73
SiO2	12,46
Al2O3	2,11
MgO	3,57
FeTotal	19,41
MnO	2,50
K2O	0,005
P2O5	1,19
S	0,105
Zn	0,011
Pb	<4 ppm
Mo	<4 ppm
As	<10 ppm
Cd	<2 ppm

Tabla 1: Composición química de la escoria BOF

Los resultados de la densidad aparente, dureza, humedad, conductividad y porcentaje de sales solubles se muestran en la Tabla 2 y se han comparado con los requisitos establecidos en la norma ISO 11126 para cada uno de los agentes abrasivos no metálicos considerados en la actualidad.

La densidad aparente se mantiene dentro de los rangos establecidos en la norma, siendo menor que en el caso de la escoria de refinado de cobre, un abrasivo no metálico cuyo uso está más extendido en la actualidad. Esto es una ventaja, principalmente para el operador de la ta-

UNE-EN ISO	Ensayo	Unid.	Requisito	Escoria de cobre	Escoria de carbón	Escoria BF	Escoria BOF
11127-3	Densidad aparente	kg/m^3	2600-3900	3300-3900	2400-2600	3000-3300	3390
11127-4	Dureza	Mohs	Min. 6	Min. 6	Min. 6	Min. 6	>6
11127-5	Humedad	%	Max. 0,2	Max. 0,2	Max. 0,2	Max. 0,2	2,62
11127-6	Conductividad	µS/cm	Max. 250	Max. 25	Max. 25	Max. 250	721
11127-7	Sales solubles	%	Max. 0,0025	Max. 0,0025	Máx. 0,0025	Máx. 0,0025	0,000

Tabla 2: Comparativa de los resultados obtenidos para la escoria BOF con la norma UNE-EN ISO 11126

Origen	Granulometría [mm]	Muestra	Conductividad [mS/m]	Media [mS/m]
BOF A	0-10	1	776	771
		2	766	
BOF B	0,2-2	1	815	801.5
		2	788	

Tabla 2: Ensayo de conductividad de la escoria cribada y tamizada

rea, ya que un abrasivo muy pesado dificultaría el manejo del equipo. Aunque la prueba de evaluación de la dureza no proporciona el valor exacto, se determina que la dureza es superior a 6 en la escala de Mohs superando el umbral establecido. La prueba de cloruro soluble en agua es satisfactoria, obteniendo un valor nulo. Los cloruros son una de las sales contaminantes más comunes en los abrasivos, por lo que el uso de escoria de BOF como abrasivo no contaminaría las superficies metálicas tratadas y no iniciaría ningún ciclo corrosivo.

Sin embargo, la prueba de humedad y conductividad del extracto acuoso muestra resultados significativamente diferentes de los valores establecidos en la norma. El material enviado para su análisis no había sido sometido a ningún tratamiento de secado, lo que podría explicar por qué el porcentaje de humedad presente en el material es tan elevado. El valor de conductividad también es superior al permitido por la norma para los abrasivos sintéticos no metálicos actualmente regulados.

Aunque en principio los materiales son idénticos salvo en su granulometría, se realizaron ensayos para comprobar este aspecto más crítico, la conductividad, en las escorias BOF de otras granulometrías puesto que, dado que el material es sintético, pueden existir diferencias apreciables. Las fracciones de distinta granulometría pueden contener proporciones diferentes de los componentes dada la anisotropía del material. Tanto las muestras de la fracción 0-10 mm como de la fracción 0,2-2 mm son pretratadas en una planta de tratamiento de separación magnética. Los resultados se muestran en la Tabla 2, presentando igualmente altos valores de conductividad. Estos valores pueden estar relacionados con la presencia de cal libre en su composición. Para verificar esta relación, sería interesante realizar un tratamiento de estabilización de la cal libre.

De los ensayos realizados se extraen como resultados:

1. La dureza de la escoria BOF cumple los requisitos establecidos. Su valor es superior a 6 Mohs, valor límite exigido en la norma ISO 11126 para los diversos abrasivos que actualmente se encuentran regulados en la misma.
2. La densidad se encuentra en los rangos permitidos. Su valor, 3390 kg/m3, podría incluso considerarse bajo con respecto al rango establecido para la escoria de refinado de cobre.
3. La humedad del material es elevada con respecto al límite máximo fijado en la norma. Mientras que la norma ISO 11126 establece un valor máximo de 0,2% de humedad, los ensayos realizados a la escoria BOF han revelado un valor de 2,62%. Esto se debe a que el material ensayado no se había secado previamente. Para su correcta caracterización la operación de secado resultaría fundamental.
4. La escoria BOF ensayada se encuentra libre de cloruros solubles en agua. Los cloruros, unas de las sales contaminantes más comunes en los abrasivos, no se encuentran presentes en la muestra ensayada. Es decir, el uso de la escoria BOF como agente abrasivo no contaminaría las superficies metálicas tratadas, por lo que no se iniciarían ciclos corrosivos.
5. La medición de la conductividad ha dado valores extremadamente elevados. Esta medida de la conductividad está relacionada directamente con la concentración de contaminantes solubles en agua (sales). El hecho de que los valores obtenidos para la escoria BOF sean tan elevados puede estar vinculado a la presencia de cal libre en su composición. Para comprobar dicha relación, sería conveniente realizar un tratamiento de estabilización de la cal libre.

4. PRUEBA DE APLICACIÓN

Además de las propiedades químicas y físicas, un abrasivo ha de satisfacer su comportamiento (generación de polvo, rendimiento, rugosidad final, ...) durante el proceso de aplicación. Con tal objetivo, se desarrolló una prueba de rendimiento industrial en una empresa especializada en tratamiento y reparación de superficies. De acuerdo con la experiencia de dichos profesionales, la cantidad requerida de abrasivos para la limpieza en seco de una chapa de acero para nueva construcción oscila entre, aproximadamente, 45 y 60 kg/m2. En el caso del tratamiento de chapas de acero para mantenimiento, como eliminación de corrosión o limpieza de pinturas fenólicas típicas de tanques de almacenamiento de agua o productos químicos, la cantidad necesaria aumentaría hasta los 100 kg/m2.

En este caso la prueba industrial se realizó comparando el comportamiento del material en un ambiente de trabajo real, desarrollando una prueba de rendimiento industrial utilizando las escorias BOF y BF granulada. El equipo empleado para la realización de la prueba fue un compresor de 8 bares de presión, conectado por una manguera con una boquilla de 4 milímetros de diámetro.

La utilización de ambas escorias todo uno, tanto escoria BF como BOF, consiguió una limpieza aceptable del material tratado (Figura 1).

Con la escoria BF como abrasivo, se obtuvo el nivel de limpieza y rugosidad requerido en las aplicaciones industriales más problemáticas, como los depósitos. En el caso de las escorias BOF, la rugosidad alcanzada en la superficie del acero

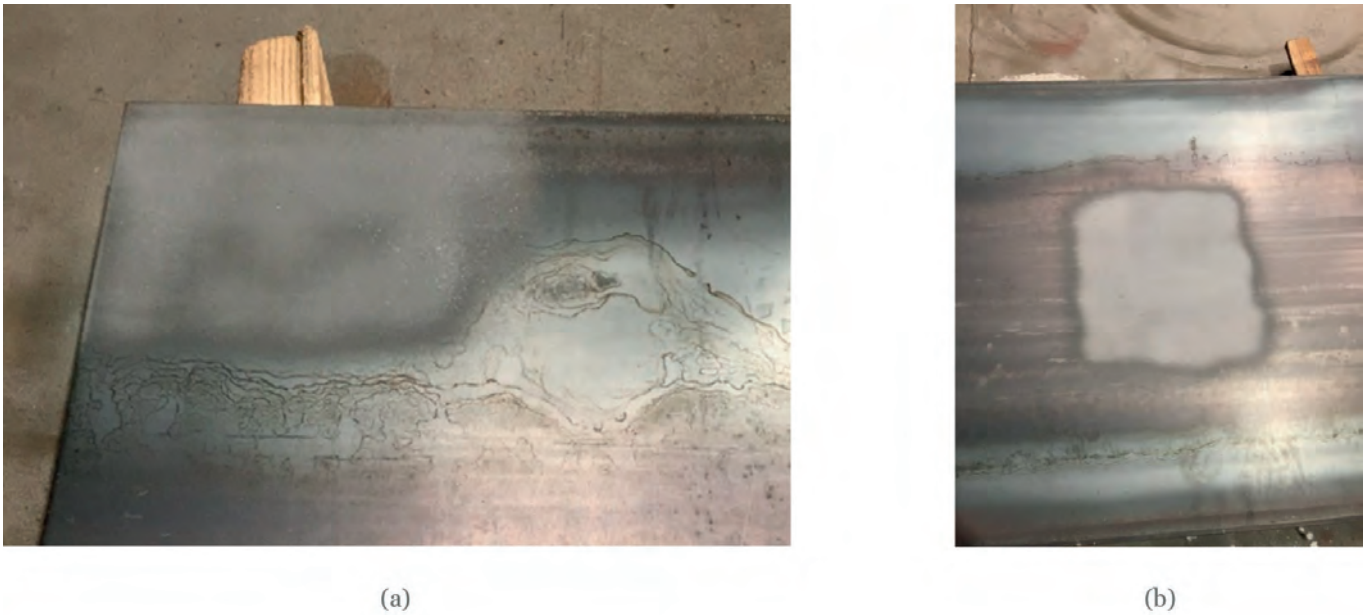


Figura 1: Chapas de acero después de la aplicación usando como abrasivo: (a) escoria BF; (b) escoria BOF

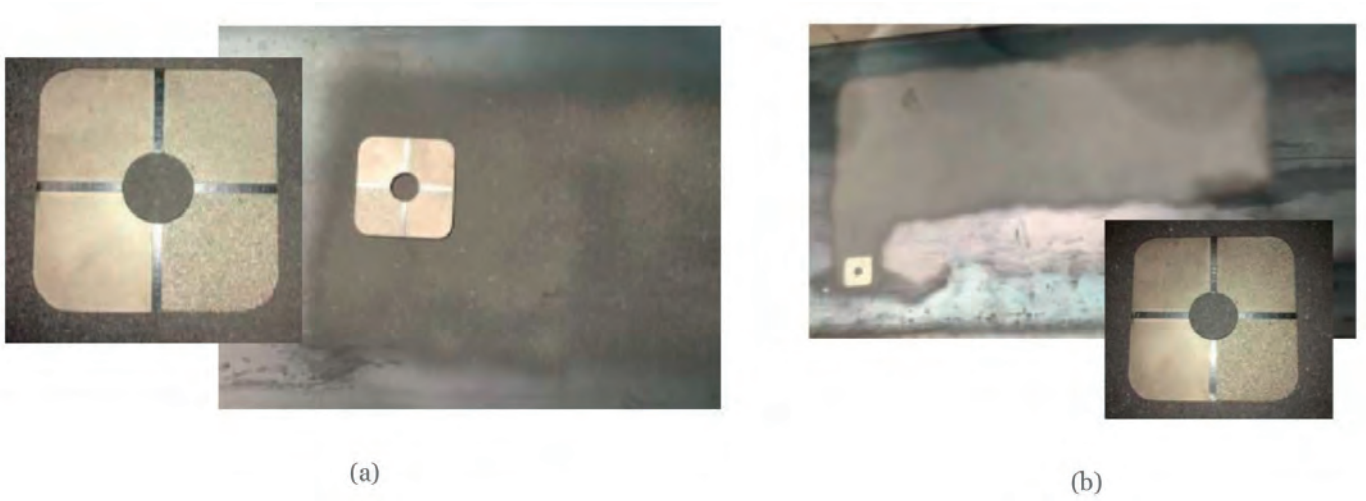


Figura 2: Lámina de acero tras el chorreado con (a) BOF-A; (b) BOF-B

fue baja, probablemente debido a la existencia de finos. Aun así, dicha escoria demostró su potencial para el chorreado en superficies donde no se requiere una alta dureza abrasiva. En ninguno de los casos el impacto de la escoria con la lámina dejó pigmentación ni manchas en la misma.

La utilización de las muestras de BOF trituradas y cribadas exige un proceso de preparación, pero permite proporcionar material comparable puesto que está dentro de los rangos de tamaños exigidos normalmente a los abrasivos en operaciones de chorreado superficial. La muestra de granulometría 0-10 mm dio lugar a la generación de polvo durante la prueba. Por el contrario, la fracción 0,2-2 mm generó muchos menos polvo y se utilizó para el tratamiento de aproximadamente un metro cuadrado de chapa de acero, lo que requirió una cantidad de 24,92 kg.

Para medir la evaluación del rendimiento se han utilizado superficies patrón de perfil medio conocido para comparación táctil-visual definidas de acuerdo con la norma ISO 8503 [21]. En el caso de la muestra 0-10 mm (escoria BOF-A), la rugosidad se sitúa entre los sectores 2 y 3, por lo que se trata de un perfil medio (Figura 2-a) equivalente al rango 60-100 µm de valor nominal (más cerca de 60 µm). En cuanto al caso de la escoria BOF-B (Figura 2-b), la rugosidad alcanzada se situó entre los sectores 3 y 4, es decir, entre 100 y 150 µm de valor nominal (más cerca de 100 µm), lo que satisface los requerimientos industriales actuales como, por ejemplo, la construcción de torres eólicas.

5. CONCLUSIONES

El chorreado superficial mediante abrasivos es un método muy extendido para la limpieza de superficies de diferentes materiales y estructuras civiles cuyo propósito principal es proteger la superficie contra la degradación de la corrosión, la fatiga y el desgaste. El mercado de los abrasivos de chorreado para la limpieza y preparación de superficies se encuentra en una necesaria evolución debido a las restricciones medioambientales y de seguridad causadas por el uso del abrasivo tradicional, la arena de sílice. Simultáneamente, las escorias BF y BOF representan un problema medioambiental debido a su alto volumen de generación por lo que su utilización como abrasivo contribuye a la valorización de los residuos generados en los diferentes procesos industriales y, por tanto, a la economía circular y al desarrollo sostenible. A partir de las pruebas realizadas se puede concluir que:

- Respecto a los abrasivos convencionales, las escorias BOF y BF presentan un rendimiento y unas características técnicas similares a la escoria de refinado de cobre, actualmente el abrasivo de origen sin-

tético más empleado en operaciones de chorreado al aire libre. Además, no requerirían equipamiento especial o adaptaciones de éste para su utilización.

- Para la correcta aplicación de la escoria como abrasivo de chorreado, se debe realizar un control de la curva granulométrica del material, tratando de aproximarlo lo más posible a tamaños cercanos a los 2 mm, con el objetivo de reducir el polvo generado y alcanzar mayores perfiles de rugosidad.
- El polvo generado en su aplicación es excesivo. Aunque parcialmente está causado por el impacto de la fracción mayoritaria (tamaños finos), el polvo de la escoria debe ser prefiltrado.
- Además, mientras que la aplicación de la escoria BF es inmediata, en el caso de la escoria BOF será preciso la disminución de su conductividad.
- El rendimiento es bajo. Los operadores y expertos calculan que es de, aproximadamente, el 80% en comparación con los abrasivos empleados actualmente. Esto tendría un impacto directo en el posible precio para su comercialización como agente abrasivo.

REFERENCIAS

[1] L. Marrucci, T. Daddi, y F. Iraldo, «The integration of circular economy with sustainable consumption and production tools: Systematic review and future research agenda», J. Clean. Prod., vol. 240, p. 118268, dic. 2019, http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118268.

[2] «FACT SHEET. Steel industry co-products.pdf», Worldsteel Association, 2018.

[3] «10th European Slag Conference - Cement Lime Gypsum», 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.zkg.de/en/artikel/zkg_10th_European_Slag_Conference_3322744.html. [Accedido: 11-dic-2019].

[4] «Statistics 2016», Euroslag. [En línea]. Disponible en: https://www.euroslag.com/products/statistics/statistics-2016/. [Accedido: 10-dic-2019].

[5] E. Furlani, G. Tonello, y S. Maschio, «Recycling of steel slag and glass cullet from energy saving lamps by fast firing production of ceramics», Waste Manag., vol. 30, n.o 8, pp. 1714-1719, ago. 2010, http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.030.

[6] A. M. Rashad, «A synopsis manual about recycling steel slag as a cementitious material», J. Mater. Res. Technol., vol. 8, n.o 5, pp. 4940-4955, sep. 2019, http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.038.

[7] J. Guo, Y. Bao, y M. Wang, «Steel slag in China: Treatment, recycling, and management», Waste Manag., vol. 78, pp. 318-330, ago. 2018, http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.045.

[8] K. Poorna Chander, M. Vashista, K. Sabiruddin, S. Paul, y P. P. Bandyopadhyay, «Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates», Mater. Des., vol. 30, n.o 8, pp. 2895-2902, sep. 2009, http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.014.

[9] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 12944-4:2018 Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 4: Tipos y preparación de superficies.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2018.

[10] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 8504-2:2002 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Métodos de preparación de las superficies. Parte 2: Limpieza por chorreado abrasivo.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2002.

[11] D. Dudek, «Comparative research on abrasive blasting of 145Cr6 steel for various working media», IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 461, p. 012015, dic. 2018, http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012015.

[12] A. A. Khan y M. M. Haque, «Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass», J. Mater. Process. Technol., vol. 191, n.o 1, pp. 404-407, ago. 2007, http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.071.

[13] F. Boud, C. Carpenter, J. Folkes, y P. H. Shipway, «Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality», J. Mater. Process. Technol., vol. 210, n.o 15, pp. 2197-2205, nov. 2010, http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.006.

[14] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 11124-2:2019 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 2: Granalla angular de fundición de hierro.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2019.

[15] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 11126-1:2019 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 1: Introducción general y clasificación.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2019.

[16] M. E. Young, D. C. M. Urquhart, y R. A. Laing, «Maintenance and repair issues for stone cleaned sandstone and granite building façades», Build. Environ., vol. 38, n.o 9, pp. 1125-1131, sep. 2003, http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00084-2.

[17] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Gobierno de España, «006. Chorreado con arena de piezas y estructuras metálicas: exposición a sílice cristalina. (2011) *en revisión* | Situaciones de Trabajo Peligrosas», 2011. [En línea]. Disponible en: http://stp.insht.es/stp/basequim/006-chorreado-con-arena-de-piezas-y-estructuras-met%C3%A1licas-exposici%C3%B3n-s%C3%ADlice-cristalina-2011. [Accedido: 11-dic-2019].

[18] B. J. Rosenberg, L. Yuan, y S. Fulmer, «Ergonomics of abrasive blasting: a comparison of high pressure water and steel shot.», Appl. Ergon., vol. 37, n.o 5, pp. 659-667, 2006, http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2005.05.014.

[19] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 11126-6:2019 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 6: Escoria de horno de hierro.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2019.

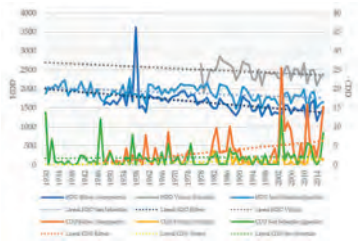
[20] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 11127:2012 Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Métodos de ensayo para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012.

[21] AENOR-ISO, «UNE-EN ISO 8503-1:2012 Preparación de substratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos afines. Características de rugosidad de los substratos de acero chorreados. Parte 1: Especificaciones y definiciones relativas a las muestras ISO de comparación táctil-visual para la evaluación de superficies preparadas mediante proyección de agentes abrasivos.» Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012.

AGRADECIMENTOS

Este trabajo se realizó con ayuda del proyecto NEWSLAG, RTC-2017-6329-5, perteneciente al Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los Restos de la Sociedad.

Influencia del cambio climático en la demanda de electricidad. El caso del País Vasco



The influence of climate change on electricity demand. Case study in the Basque Country

Kepa Solaun[1,2] y Emilio Cerdá[3]

[1] Universidad de Navarra. Escuela de Ciencias. Campus de Pamplona - 31080 Pamplona (España)
[2] Factor CO_2. Colón de Larreátegui, 26 1 - 48009 Bilbao (España)
[3] Universidad Complutense de Madrid. ICEI. Somosaguas Campus - 28223 Pozuelo de Alarcón, Madrid (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9344 | Recibido: 30/05/2019 • Inicio Evaluación: 30/05/2019 • Aceptado: 18/09/2019

ABSTRACT

• This article analyzes the sensitivity of electricity demand by sector to temperature, in the context of climate change. The paper outlines a methodology to incorporate climate variables into energy decision making. This methodology is based on the evolution of the thermal distance on cold and warm days with respect to established thresholds (Heating Degree Days and Cooling Degree Days) and its influence on demand. This approach has been tested in the Basque Country. Results show that the residential sector is the most sensitive to these changes, and future demand is projected according to multiple climate change scenarios. Due to the greater statistical significance of temperature differences on cold days, and the current limited use of air conditioning, it is estimated that residential demand could fall by as much as 4%, which could translate to nearly 20 million euros in annual savings and emission reductions of around 30,000 t. of CO_2 per year.

• **Keywords:** Climate Change, Adaptation to Climate Change, Energy Demand, Energy Economics.

RESUMEN

Este artículo analiza la sensibilidad de la demanda sectorial a la temperatura en un contexto de cambio climático. El trabajo desarrolla una metodología para incorporar variables climáticas en el proceso de toma de decisión en materia de energía. Esta metodología se basa en la evolución de los diferenciales térmicos en días fríos y cálidos con respecto a ciertos umbrales (gradientes de calefacción día y gradientes de refrigeración día). Esta aproximación ha sido utilizada en el País Vasco. Los resultados muestran que el sector residencial es el más sensible a estas variaciones y la demanda futura es proyectada de acuerdo con varios escenarios de cambio climático. Debido a la mayor relevancia estadística de los diferenciales en los días fríos, así como al uso actual limitado del aire acondicionado, se estima que la demanda residencial podría descender hasta un 4%, lo que podría traducirse en un ahorro anual de 20 millones de euros y en unas reducciones de emisiones de en torno a 30.000 toneladas de CO_2 anuales.

Palabras clave: Cambio Climático, Adaptación al Cambio Climático, Demanda Energética, Economía Energética.

1. INTRODUCCIÓN

El sector eléctrico, debido al uso de combustibles fósiles no renovables, contribuye de manera sustancial al cambio climático y, al mismo tiempo, puede verse afectado de forma relevante por el mismo [1,2]. Esta afección no se limita a la generación, sino que también puede tener repercusiones en las redes de distribución o la demanda [1,3–5].

Varios estudios han demostrado que la demanda de electricidad es sensible a variaciones en la temperatura y, por tanto, el cambio climático puede conllevar cambios en el consumo [6–8]. Generalmente, la relación entre temperatura y consumo de energía tiene una forma de U, de forma que el consumo aumenta tanto con temperaturas muy bajas como muy altas [9–12].

La influencia del clima depende en buena medida de la ubicación del área de estudio y sus fuentes de energía [9]. La sensibilidad del cambio climático a la temperatura es positiva en algunos lugares y negativa en otros, dependiendo de su geografía y climatología [7].

En Europa, algunos modelos apuntan a que los efectos en la demanda serán superiores a los relativos a generación [13] y a que las predicciones meteorológicas pueden ser útiles para estimar la demanda a corto y medio plazo [14,15]. Con respecto a los impactos a largo plazo, algunos estudios proyectan una reducción en la demanda de electricidad, ya que se espera que el impacto de la disminución del consumo en el invierno sea mayor que el aumento en el verano [16–18]. Esto puede conducir a una reducción de hasta un 22% a largo plazo [17]. Esta disminución también se vería en el sur de Europa, incluida España. Sin embargo, otro artículo predice un efecto neto neutral [12].

España está formada por varias regiones climáticas, lo que tiene un impacto importante en la estructura de la demanda. [19]. Varios estudios han analizado los factores que influyen más significativamente, como el clima, con un énfasis particular en el sector residencial [19,20.

El País Vasco es una Comunidad Autónoma española, cuya demanda de electricidad se caracteriza por el elevado peso del sector industrial, que representa el 55% del consumo, seguido por servicios (24%) y los hogares (19%) [21]. De las tres provincias que lo componen, Vizcaya representa casi la mitad del consumo (47%), lo que es consistente con su proporción de población (52%) y PIB (50%)[1].

En cuanto al clima, el País Vasco es más templado que el promedio de España, aunque las proyecciones apuntan a un aumento de las temperaturas. Esto se traducirá en menos días fríos, más

[1] Datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), 2015.

días cálidos y un aumento de los valores extremos. [22]. Los estudios realizados en países más fríos predicen una disminución significativa en el consumo de calefacción a medida que disminuyen la frecuencia y la intensidad de los días fríos. En algunos casos, la demanda de electricidad puede caer hasta un 14% para mediados de siglo [23].

El objetivo de este artículo es analizar en qué medida la demanda eléctrica del sector residencial en el País Vasco es sensible a variaciones de temperatura y, a partir de esta relación, proyectar cómo puede evolucionar bajo escenarios de cambio climático. La metodología se basa en el cálculo de las diferencias térmicas entre la temperatura promedio diaria y ciertos umbrales de confort.

Para ello, se estructura de la siguiente manera: la sección dos da un resumen de la metodología utilizada y del alcance del estudio. La sección tres, por su parte, analiza la composición y evolución de la demanda en el País Vasco. La sección cuatro analiza la evolución de la temperatura en relación con la metodología utilizada en este trabajo. La sección cinco se centra en explorar la correlación entre el consumo de electricidad y la evolución del clima. A partir de ello, la sección sexta proyecta cómo el cambio de temperatura puede afectar a la demanda en el sector residencial en el futuro. El artículo se cierra con una discusión de los resultados en el marco de la política energética del País Vasco y su correlato europeo.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este documento se resume en cinco pasos:

1. **Recopilación de datos sobre la demanda eléctrica.** El uso de datos con alta resolución estacional (y sectorial) es necesario para poder rastrear la influencia del clima. Los datos se agregan para corresponderse con la información climática.
2. **Recopilación de información climática y cálculo de** *Heating Degree Days* **y** *Cooling Degree Days***.**

Muchas fuentes en la literatura analizan la relación entre las variables climáticas y la demanda de energía en función del cálculo de las desviaciones de temperatura con respecto a umbrales de confort. En España, esta metodología se ha utilizado para analizar la sensibilidad de la demanda residencial [19,20,24]. Esto proporciona mejores resultados que usar temperaturas medias, debido a la relación no lineal entre los cambios de temperatura y la demanda [19].

Así, se definen los *Cooling Degree Days* (CDD) y *Heating Degree Days* (HDD) como la suma de los diferenciales térmicos en los días en que la temperatura promedio se desvía de ciertos umbrales de frío o calor, dentro de un período determinado. Se calculan utilizando la siguiente metodología [17,20,25,26]:

$$HDD_{year} = \sum_{days} max\,(0, (Ct - At))$$

$$CDD_{year} = \sum_{days} max\,(0, (At - Ct))$$

Donde:
HDD = *Heating Degree Days*.
CDD= *Cooling Degree Days*.
Ct= temperatura de confort expresada en ºC. Este artículo utiliza 18º y 26ºC, ya que estos son los umbrales empleados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para sus proyecciones, pero a continuación se realizará un análisis de sensibilidad con distintos valores.
At= temperatura promedio diaria, expresada en ºC.

Para calcular los HDD y CDD, se utilizaron datos meteorológicos de AEMET para las tres capitales de provincia, ya que contienen las mayores concentraciones de población y actividad económica.

3. **Análisis de correlación y dependencia de la información climática y energética.**

Este artículo desarrolla un análisis de correlación entre estos datos y el consumo de electricidad sectorial de 2012 a 2017 (datos mensuales). Para utilizar las mismas clasificaciones sectoriales y contrastar los datos con otras variables, el consumo se agrupará en 16 sectores.

Se ha realizado también una prueba de significatividad bilateral.

4. **Proyección de HDD y CDD y demanda energética.**

La evolución de HDD y CDD se puede proyectar utilizando modelos climáticos con una suficiente desagregación geográfica. En este trabajo, se han utilizado las proyecciones regionales de AEMET/Euro-CORDEX a través de la plataforma Adaptecca en cada provincia para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 del 5AR del IPCC [27]. Estos escenarios consolidan hipótesis sobre las principales variables que afectan el clima. El RCP 4.5 proyecta un aumento moderado en la temperatura del aire en superficie (entre 1.1º y 2.6ºC), que puede ser consistente con los escenarios de política internacional de cambio climático. El RCP 8.5, por su parte, sugiere mayores aumentos de temperatura a futuro (entre 2.6º y 4.8ºC).

Dado que el sector residencial muestra la correlación más alta, como se mostrará a continuación, la demanda de este sector se proyectará en función de la evolución esperada de los HDD y CDD.

5. **Cálculo de costos o beneficios y emisiones.**

Dependiendo de los resultados, puede haber costes (cuando la demanda aumenta) o beneficios (cuando la demanda disminuye). En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que los precios de la electricidad difieren entre los sectores económicos.

Con respecto a las emisiones, las estimamos considerando el aumento o disminución de la demanda y la intensidad media de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de la generación de electricidad. Como este documento se centra en resaltar el impacto específico del cambio climático en el sistema existente, utilizaremos la intensidad de carbono actual, de acuerdo con los últimos datos publicados del sistema eléctrico español (de 2017 [28]). Las emisiones futuras proyectadas también podrían basarse en estrategias energéticas u objetivos climáticos.

3. LA DEMANDA ELÉCTRICA EN EL PAÍS VASCO

Este artículo basa su análisis en los datos del Ente Vasco de Energía (EVE, Gobierno Vasco). Estos datos proporcionan un marco de tiempo corto (2012-2017) pero con resolución mensual. Estos datos son consistentes con los del Ministerio español para la Transición Ecológica. Este ofrece un alcance temporal más amplio, pero solo resolución anual, por lo que no es tan útil para los propósitos de este estudio. Si bien existen pequeñas diferencias, los resultados globales son generalmente consistentes (Figura 1).

En las tres provincias, se detecta un cambio de tendencia coincidente con la crisis económica de 2008. Álava y Vizcaya tienen su máximo consumo en 2008, mientras que Guipúzcoa lo tiene en 2007. Después, los consumos continúan una línea descendente en Vizcaya y Guipúzcoa y solo Álava muestra consumos más altos en 2017 que en 2000.

	Consumo (GWh)				Distribución %			
SECTOR	ÁLAVA	VIZCAYA	GUIPÚZCOA	TOTAL	ÁLAVA	VIZCAYA	GUIPÚZCOA	TOTAL
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	63	88	134	285	0.4%	0.2%	0.4%	0.3%
Industrias extractivas	788	868	658	2,314	5.3%	2.0%	2.0%	2.5%
Energía eléctrica, gas y vapor	1,418	385	165	1,968	9.6%	0.9%	0.5%	2.2%
Industrias alimentarias, bebidas, tabaco	454	561	691	1,705	3.1%	1.3%	2.1%	1.9%
Textil, confección, cuero y calzado	11	46	124	181	0.1%	0.1%	0.4%	0.2%
Madera, papel, artes gráficas	230	1,750	4,450	6,430	1.6%	4.0%	13.4%	7.0%
Caucho, plásticos y otros	405	963	859	2,227	2.7%	2.2%	2.6%	2.4%
Industria química, petroquímica y productos farmacéuticos	381	3,710	1,225	5,317	2.6%	8.5%	3.7%	5.8%
Metalurgia y productos metálicos	3,369	11,788	8,199	23,356	22.7%	27.1%	24.7%	25.6%
Material eléctrico, maquinaria, vehículos, material de transporte	1,981	3,232	4,405	9,618	13.4%	7.4%	13.3%	10.5%
Construcción y obras públicas	94	345	233	673	0.6%	0.8%	0.7%	0.7%
Transporte y almacenamiento	541	1,946	1,017	3,504	3.6%	4.5%	3.1%	3.8%
Hostelería	381	1,372	931	2,684	2.6%	3.2%	2.8%	2.9%
Comercio y servicios	1,347	4,220	2,792	8,360	9.1%	9.7%	8.4%	9.1%
Hogares	2,197	8,600	5,239	16,036	14.8%	19.8%	15.8%	17.5%
Administración y servicios públicos	1,167	3,560	2,007	6,734	7.9%	8.2%	6.1%	7.4%
Total	14,829	43,437	33,128	91,393	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Tabla 1: Distribución sectorial de la demanda eléctrica 2012-2017. Fuente: EVE

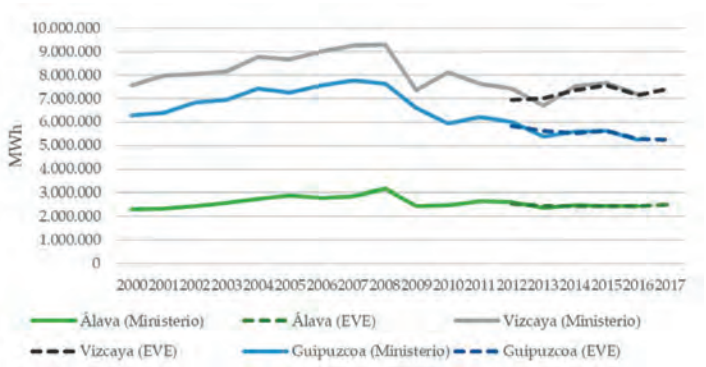


Figura 1: Demanda de electricidad de 2000 a 2017 con datos de EVE y el Ministerio para la Transición Ecológica

La estructura sectorial no varía significativamente entre provincias (Tabla 1). La metalurgia se destaca como el mayor consumidor de electricidad en todas entre 2012 y 2017, representando casi el 25%, seguido por los hogares. En términos absolutos, Vizcaya es la provincia con mayor consumo, seguida de Guipúzcoa y Álava. Estacionalmente, no hay grandes diferencias entre provincias a lo largo del año, aunque la primavera es, ligeramente, la estación con mayores consumos eléctricos en todas.

Respecto al sector residencial, el consumo por habitante durante este período es muy similar en las provincias, con un mayor consumo en Vizcaya (1,24 kWh), seguido de Guipúzcoa (1,22) y, por último, Álava (1,13)[2]. Sin embargo, estas diferencias no superan el 10% y permanecen estables, en términos relativos, con el tiempo.

La vivienda vasca se caracteriza por una elevada presencia de gas natural para calefacción. El 59 % de las viviendas usan distintas formas de calefacción con gas natural, un 22% usa electricidad, 14% gasóleo, 7% otros y el 9% no dispone de ningún sistema de calefacción [29]. Varias viviendas usan una combinación de estos sistemas. En comparación con el promedio español, el porcentaje de viviendas que usa electricidad para calefacción es similar y es superior la penetración de gas natural [30].

La calefacción representa el 30% del consumo de electricidad en los hogares vascos [29]. La vivienda es mayoritariamente en bloque (74%) con menor presencia de viviendas unifamiliares (26%) que en el promedio español [31]. Únicamente un 1,7% de las viviendas dispone de aire acondicionado, siendo su presencia más elevada en Guipúzcoa (3.5%, [29]).

4. EVOLUCIÓN DEL CLIMA

En los estudios de zonas climáticas según la clasificación de Köppen-Geiger, el País Vasco suele estar encuadrado dentro de la zona Cfb (clima templado sin estación seca y con verano templado) [32,33]. Si se mira con mayor resolución, sin embargo, buena parte del territorio de Álava se encuentra dentro de la zona Csb (clima templado, con verano seco y templado) [34]. Vizcaya y Guipúzcoa se encuentran bajo la influencia del Atlántico Norte, mientras que Álava tiene un clima más continental [24,31,35]. Esto se traduce en precipitaciones más frecuentes y temperaturas más suaves en los primeros.

Siguiendo la metodología descrita, los HDD y CDD se han calculado para cada capital. Vitoria es la ciudad con mayor cantidad de HDD, seguida de San Sebastián y Bilbao. Respecto a los CDD, la relación es la inversa, y Bilbao es el más destacado, seguido por San Sebastián y Vitoria.

Los datos de AEMET (con períodos de inicio distintos según disponibilidad) muestran una tendencia al alza en los CDD y a la baja en los HDD en las tres ciudades (Figura 2). La tendencia se muestra debido a la variabilidad climática anual y se ha calculado utilizando el método de mínimos cuadrados. Esta tendencia es consistente con el contexto de aumento de las temperaturas promedio a lo largo del tiempo. Hay una diferencia notable entre la cantidad absoluta de CDD y HDD registrados, como se ve en las diferentes escalas utilizadas para los ejes izquierdo (HDD) y derecho (CDD), respectivamente.

[2] Según los datos energéticos del EVE y el dato oficial de población del INE.

5. CORRELACIÓN ENTRE TEMPERATURA Y CONSUMO DE ENERGÍA

Los HDD y CDD se han agregado y se ha analizado su correlación con la demanda. Las correlaciones tienden a ser modestas (Tabla 2), pero el sector residencial muestra la más clara, seguido por Administración y servicios públicos, y comercio y servicios. Este último puede verse influenciado por una disminución de la demanda de servicios durante el invierno, coincidiendo con la mayor concentración de HDD. En muchos sectores, especialmente en los industriales, la incidencia de clima no parece tan relevante en el consumo, tal y como podía esperarse, debido que su demanda puede estar más condicionada por necesidades de producción. Se proporciona más información sobre el análisis de correlación y significación estadística en los materiales complementarios.

En este análisis, se han utilizado como umbrales 18º y 26ºC, tal y como se ha explicado. Para el sector residencial, se ha desarrollado un análisis de sensibilidad modificando los umbrales establecidos de HDD y CDD, de acuerdo con los valores más relevantes en la literatura [26] (Tabla 3). Las diferencias, aunque no muy significativas, indican correlaciones promedio más altas usando 18ºC como umbral para los HDD, incluso si los valores en Álava son ligeramente más bajos.

Es probable que la expansión del gas natural haya contribuido a una menor sensibilidad, aunque la red no ha cambiado significativamente en los últimos

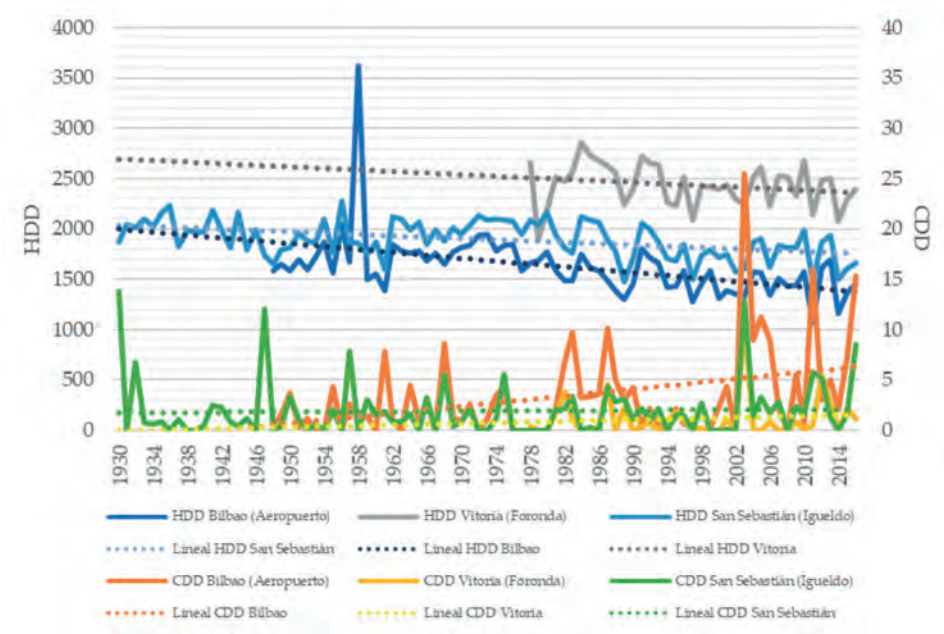


Figura 2: Evolución de los HDD y CDD. Fuente: Elaboración propia en base a datos de AEMET

SECTOR	Álava	Vizcaya	Guipúzcoa	Promedio
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	-70%	-14%	-10%	-31%
Industrias extractivas	-8%	-42%	-12%	-21%
Energía eléctrica, gas y vapor	5%	11%	-7%	3%
Industrias alimentarias, bebidas, tabaco	-47%	-28%	-58%	-45%
Textil, confección, cuero y calzado	22%	-12%	8%	6%
Madera, papel, artes gráficas	1%	-19%	-6%	-8%
Caucho, plásticos y otros	10%	8%	-11%	2%
Industria química, petroquímica y productos farmacéuticos	4%	-22%	-12%	-10%
Metalurgia y productos metálicos	20%	2%	23%	15%
Material eléctrico, maquinaria, vehículos, material de transporte	21%	20%	22%	21%
Construcción y obras públicas	41%	27%	33%	34%
Transporte y almacenamiento	62%	16%	37%	38%
Hostelería	-33%	-40%	-68%	-47%
Comercio y servicios	53%	19%	44%	39%
Hogares	50%	68%	69%	63%
Administración y servicios públicos	64%	46%	59%	56%
Total demanda	36%	28%	48%	37%

Tabla 2: Correlación entre demanda y HDD + CDD por provincia y sector. Se han resaltado correlaciones superiores al 50%. Fuente: elaboración propia

	HDD 13				HDD 15				HDD 18			
	ÁLAVA	VIZCAYA	GUIPÚZCOA	PROMEDIO	ÁLAVA	VIZCAYA	GUIPÚZCOA	PROMEDIO	ÁLAVA	VIZCAYA	GUIPÚZCOA	PROMEDIO
CDD 22	52%	60%	70%	61%	51%	66%	70%	62%	50%	68%	69%	63%
CDD 24	53%	63%	70%	62%	51%	67%	70%	63%	50%	68%	69%	63%
CDD 26	53%	64%	70%	62%	51%	67%	70%	63%	50%	68%	69%	63%

Tabla 3: Análisis de la sensibilidad de las correlaciones en el sector residencial a los umbrales. Fuente: elaboración propia

Álava

Escenario	2021-2045 vs. 2012-2017				2046-2070 vs. 2012-2017				2071-2095 vs. 2012-2017		
	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)	Reducción CO2 (t)	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)	Reducción CO2 (t)	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)
RCP 4.5	3,663	1%	686,095	1,023	6,065	2%	1,135,905	1,694	8,003	2%	1,498,956
RCP 8.5	2,987	1%	559,498	834	8,375	2%	1,568,581	2,339	13,801	4%	2,584,985

Vizcaya

Escenario	2021-2045 vs. 2012-2017				2046-2070 vs. 2012-2017				2071-2095 vs. 2012-2017		
	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)	Reducción CO2 (t)	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)	Reducción CO2 (t)	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)
RCP 4.5	13,258	1%	2,483,217	3,703	23,126	2%	4,331,484	6,460	32,268	2%	6,043,750
RCP 8.5	9,881	1%	1,850,690	2,760	33,189	2%	6,216,365	9,271	59,405	4%	11,126,557

Guipúzcoa

Escenario	2021-2045 vs. 2012-2017				2046-2070 vs. 2012-2017				2071-2095 vs. 2012-2017		
	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)	Reducción CO2 (t)	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)	Reducción CO2 (t)	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)
RCP 4.5	13,503	2%	2,529,142	3,772	21,597	2%	4,045,074	6,033	28,495	3%	5,337,103
RCP 8.5	12,813	1%	2,399,897	3,579	23,947	3%	4,485,245	6,689	34,860	4%	6,529,202

País Vasco (todas las provincias)

Escenario	2021-2045 vs. 2012-2017				2046-2070 vs. 2012-2017				2071-2095 vs. 2012-2017		
	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)	Reducción CO2 (t)	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)	Reducción CO2 (t)	Ahorro anual (MWh)	Reducción (%)	Ahorros anuales (€ 2018)
RCP 4.5	30,424	1%	5,698,454	8,498	50,787	2%	9,512,463	14,187	68,766	3%	12,879,809
RCP 8.5	25,681	1%	4,810,085	7,174	65,511	2%	12,270,191	18,299	108,066	4%	20,240,744

Tabla 4: Disminución proyectada en el consumo, ahorro económico y reducción de emisiones en el sector residencial 2012-2017. Fuente: elaboración propia

años[3]. Políticas recientes apuntan a la futura electrificación del calor como una forma de reducir las emisiones, lo que podría contribuir a invertir esta tendencia [36,37].

6. PROYECCIÓN DE CLIMA FUTURO

Las proyecciones climáticas para el País Vasco predicen un aumento de las temperaturas medias de 1º a 5ºC para finales de siglo, según escenario [22]. Este aumento sería homogéneo, aunque levemente menor en la costa que en el interior. Los índices relacionados con días de temperaturas bajas tenderían a disminuir, mientras que los asociados con días de temperaturas altas aumentarían.

En términos de las zonas climáticas de Köppen-Geiger, no se espera un cambio notable, aunque para finales de siglo parte del sur del País Vasco podría situarse dentro de la zona Cwb (clima seco y veranos cálidos) [38].

El cambio en los HDD y CDD proyectados por AEMET en comparación con el período de referencia de 2012-2017 se ha calculado (Figura 3). El RCP 4.5 muestra una disminución gradual en HDD, mientras que el 8.5 es menos lineal pero más pronunciado a finales de siglo. Las diferencias entre provincias son escasas, aunque Vizcaya tiende a ser la provincia con mayor disminución.

El aumento proyectado en los CDD es más notable. Nuevamente, el RCP 8.5 revela una evolución menos lineal, pero más pronunciada entre 2046 y 2070. Álava experimenta el mayor aumento, con mayores diferencias entre provincias que en los HDD.

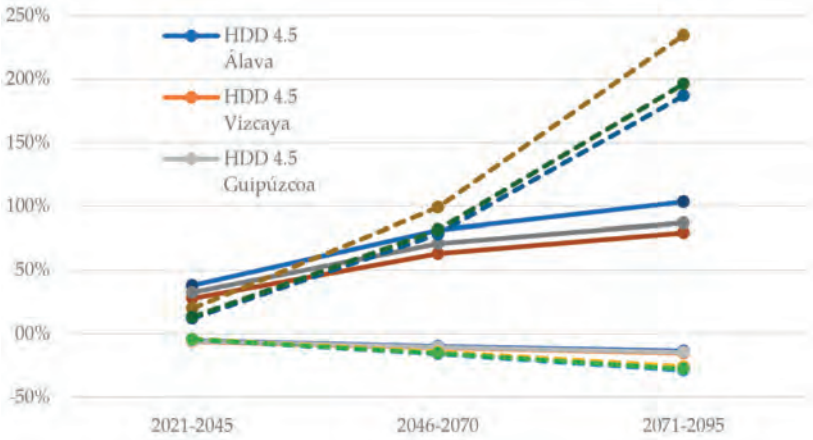


Figura 3: Evolución promedio proyectada de HDD y CDD en comparación con 2012-2017. Fuente: elaboración propia basada en datos de AEMET

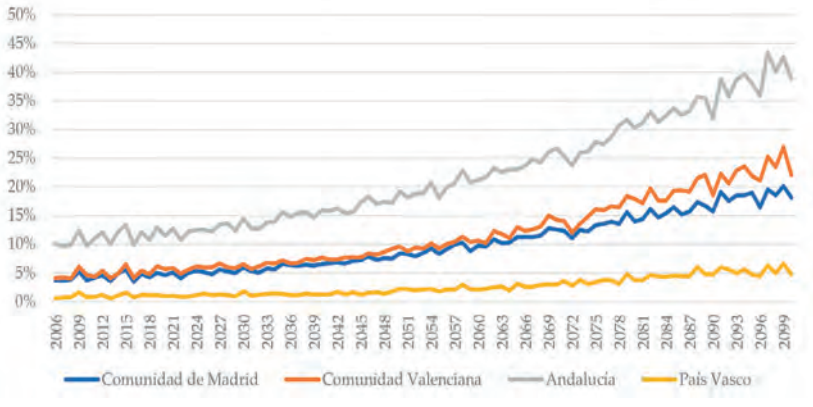


Figura 4: Relación histórica y proyectada (RCP 8.5) de CDD / HDD en cuatro Comunidades Autónomas. Fuente: elaboración propia basada en datos de AEMET / Euro-CORDEX

En cualquier caso, como se explicará más adelante, la proporción de CDD sobre HDD apenas llega al 1% en el periodo histórico y, pese a su aumento esperado, apenas superará ligeramente el 5% en 2100 en los escenarios más extremos.

[3] Los Informes Anuales sobre el mercado minorista de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia señalan una pequeña disminución en el consumo residencial de gas natural entre 2010 y 2016: https://www.cnmc.es/ambitos-de-actuacion/energia/mercado-gas

Se ha cuantificado la disminución futura del consumo en el sector residencial como consecuencia de estos cambios (Tabla 4). Las reducciones anuales comienzan en 1% en todas las provincias y escenarios y, para finales de siglo, oscilan entre el 2% al 4%. Las reducciones, como se esperaba, son mayores en un escenario climático más intenso (RCP 8.5) y a largo plazo. Las variaciones son ligeramente más altas en Guipúzcoa. En términos económicos, bajo el RCP 8.5 y a los precios actuales de la electricidad[4], esto podría significar un ahorro anual de casi 20 millones de euros entre las tres provincias para finales de siglo.

Con respecto a las emisiones de CO_2, las reducciones totales podrían alcanzar las 30,000 toneladas anuales bajo el RCP 8.5[5].

Los resultados muestran que las reducciones en los HDD tendrán un mayor impacto que los aumentos en CDD, lo que es consistente con la literatura existente, como se discutirá más adelante. No se espera que el aumento de los días cálidos tenga un impacto notable en el consumo del sector durante los próximos 50 años. Las relaciones históricas y proyectadas de diferenciales térmicos en días cálidos a días fríos son pequeñas en comparación con otras Comunidades Autónomas (Figura 4).

7. DISCUSIÓN

Este artículo ha analizado la sensibilidad de la demanda de electricidad en el País Vasco a la temperatura para proyectar cómo el cambio climático puede influir en ella. Los resultados muestran que el sector residencial es el más sensible a los cambios de temperatura, particularmente en los días fríos.

Se ha utilizado una metodología basada en HDD y CDD. En la serie histórica de datos climáticos, se observa una reducción en la cantidad de HDD y un aumento en la cantidad de CDD en las tres capitales de provincia. Esta es también la tendencia a la que apuntan las proyecciones futuras.

El impacto de los cambios de temperatura podría ser importante y positivo para el sector residencial. Los escenarios bajo un cambio climático más significativo (RCP 8.5) predicen una caída del consumo de hasta un 4% para finales de siglo, lo que podría traducirse en un ahorro anual de casi 20 millones de euros.

Desde el punto de vista del desarrollo de políticas, este artículo destaca la importancia de tener en cuenta las variaciones climáticas durante la planificación y el diseño de la infraestructura energética. Esta cuestión se vuelve muy relevante debido a los objetivos europeos, españoles y vascos sobre emisiones y consumo. Con el estado actual de las tecnologías, el cumplimiento de los objetivos más ambiciosos solo se puede lograr mediante la expansión de la generación de electricidad renovable y mediante la sustitución de otras fuentes de energía térmica (particularmente gas natural y combustibles fósiles tradicionales) con electricidad.

La electrificación de los usos térmicos de la energía daría a los resultados de este estudio, y a la elasticidad del consumo de electricidad al clima, una mayor relevancia cuantitativa. Esta transformación ya está prevista en el Plan de Energía de la Comunidad Autónoma, con énfasis en el sector del transporte [36]. A nivel europeo, la contribución de la electricidad a la demanda total de energía prácticamente se duplicaría para 2050, según la Hoja de Ruta de Energía [37].

La eficiencia energética puede también desempeñar un papel relevante en este contexto. A medida que los dispositivos de calefacción y refrigeración se vuelven más eficientes, las necesidades de energía adicionales requerirían un menor consumo marginal. La reducción de la intensidad energética es un objetivo relevante en la planificación energética y climática a nivel europeo, español y vasco, y las medidas para fomentarla en el sector residencial son parte integral de ella.

En la misma línea, a medida que aumenta la temperatura, se espera una mayor prevalencia de los sistemas de aire acondicionado, lo que haría que la demanda fuera más sensible a los cambios en el verano. Aun así, algunos estudios predicen una disminución neta del consumo, incluso en los países del sur de Europa, debido a la importancia relativa de las diferencias de temperatura en los días fríos [17,18].

Sin embargo, otro documento que analiza todos los sectores sugiere un aumento en el consumo diario promedio de electricidad en España de entre 0.2% y 5.6% (RCP 4.5 y 8.5 [12]). No obstante, las tendencias de este estudio no son homogéneas para los países ubicados en la misma zona climática que el País Vasco [33] (a pesar de tener temperaturas medias más bajas[6]), como Francia o Croacia. En países europeos más fríos, el aumento de las temperaturas promedio conduce a un consumo general más bajo, ya que las temperaturas ligeramente más altas no implican el uso de aire acondicionado.

En otros lugares, como Estados Unidos, se prevé que el consumo aumente, dado que la creciente necesidad de refrigeración es mayor a la decreciente necesidad de calefacción [39]. La extensión de los dispositivos de aire acondicionado en el sector residencial es mucho mayor en este país (65%) que en la Unión Europea (5%) [16].

Otra observación relevante, desde una perspectiva política, es la necesidad de alinear las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático [40]. A medida que se disponga de más información sobre los impactos del cambio climático, las políticas de reducción de emisiones a largo plazo deberían evaluar si las medidas propuestas son resilientes y si su desarrollo pudiera verse comprometido por el cambio climático.

Se deben tener en cuenta varias limitaciones en los datos disponibles sobre el consumo de electricidad. Estos tienen un alcance limitado en comparación con los datos climáticos. Los datos mensuales se limitan al período de 2012-2017 (seis años) y, a medida que exista más información, esta podrá ser comparada con las proyecciones establecidas en este documento. Del mismo modo, el uso de datos con una resolución temporal más alta podría proporcionar más precisión.

Los resultados se beneficiarán de mayor investigación en el campo y, en particular, será importante conocer en qué medida la electrificación de usos térmicos puede conducir a una mayor sensibilidad. En cualquier caso, la proporción actual y esperada del diferencial térmico en los días fríos parece que seguirá siendo sustancialmente más relevante que la de los días cálidos, de acuerdo con la metodología empleada en la literatura.

[4] Precios suministrados por Eurostat durante el primer semestre de 2018: https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database

[5] Una reducción en el mix de emisiones es esperable en el futuro, de acuerdo con el borrador de Plan Nacional de Energía y Clima (2019), así como con los objetivos europeos. Si estos objetivos fueran cumplidos, las reducciones serían menores.

[6] De acuerdo a los datos del Climate Change Knowledge Portal (provenientes de la Climatic Research Unit de la Universidad de East Anglia) los promedios entre 1961-1990 serían de 10,6ºC en Francia o 10,4ºC en Croacia. Lejos de los 14,1 de Bilbao, 11,4 de Vitoria o 13,0 de San Sebastián que ofrece la serie de AEMET para esos mismos años.

REFERENCIAS

[1] Arent, D.J., Tol, R.S.J, Faust, E., Hella, J.P., Kumar, S., Strzepek, K.M., Tóth, F.L. and Yan D. Key economics sectors and services. Clim. Chang. 2014 Impacts, Adapt. Vulnerability. Part A Glob. Sect. Asp. Contrib. Work. Gr. II to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang. Chang., Cambridge, NY: Cambridge University Press; 2014.
[2] Solaun K, Cerdá E. The impact of climate change on the generation of hydroelectric power-a case study in southern Spain. Energies 2017;10. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/en10091343.
[3] Ebinger J, Vergara W. Climate Impacts on Energy Systems: key issues for energy sector adaptation. Washington, DC, USA: The World Bank; 2011.
[4] Johnston PC. Climate Risk and Adaptation in the Electric Power Sector. Manila, Phillippines: Asian Development Bank - Publications; 2012.
[5] Ahenkorah, Alfred; Caceres-Rodriguez Rodolfo; Devernay, Jean-Michel; Freitas Marcos; Hal, Douglasl; Killingtveit Ånund; Zhiyu L. Hydropower. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge, NY: Cambridge University Press; 2011.
[6] Howden, S.M. and Crimp S. Effect of Climate and Climate Change on Electricity Demand in Australia. CSIRO Sustain Ecosyst 2001.
[7] Sailor DJ. Relating residential and commercial sector electricity loads to climate - Evaluating state level sensitivities and vulnerabilities. Energy 2001;26:645–57. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00023-8.
[8] Trotter IM, Bolkesjo TF, Féres JG, Hollanda L. Climate change and electricity demand in Brazil : A stochastic approach. Energy 2016;102:596–604. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.120.
[9] Ahmed T, Muttaqi KM, Agalgaonkar AP. Climate change impacts on electricity demand in the State of New South Wales, Australia. Appl Energy 2012;98:376–83. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.059.
[10] Mirasgedis S, Sarafidis Y, Georgopoulou E, Kotroni V, Lagouvardos K, Lalas DP. Modeling framework for estimating impacts of climate change on electricity demand at regional level: Case of Greece. Energy Convers Manag 2007;48:1737–50. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.022.
[11] Valor, E., Meneu, V., Caselles V. Daily Air Temperatura and Electricity Load in Spain. J Appl Meteorol 2001;40:1413–21.
[12] Wenz L, Levermann A, Auffhammer M. North – south polarization of European electricity consumption under future warming 2017:1–9. DOI: http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1704339114.
[13] Dowling P. The impact of climate change on the European energy system. Energy Policy 2013;60:406–17. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.093.
[14] Felice M De, Alessandri A, Catalano F. Seasonal climate forecasts for medium-term electricity demand forecasting. Appl Energy 2015;137:435–44. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.030.
[15] Apadula F, Bassini A, Elli A, Scapin S. Relationships between meteorological variables and monthly electricity demand. Appl Energy 2012;98:346–56. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.053.
[16] Mima S, Criqui P. The Costs of Climate Change for the European Energy System, an Assessment with the POLES Model. Environ Model Assess 2015;20:303–19. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s10666-015-9449-3.
[17] Kitous A, Després J. Assessment of the impact of climate change on residential energy demand for heating and cooling. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.2760/96778.
[18] Damm A, Köberl J, Prettenthaler F, Rogler N, Töglhofer C. Impacts of + 2 ° C global warming on electricity demand in Europe. Clim Serv 2017;7:12–30. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cliser.2016.07.001.
[19] Blazquez L, Boogen N, Filippini M. Residential electricity demand in Spain: New empirical evidence using aggregate data. Energy Econ 2013;36:648–57. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2012.11.010.
[20] Romero-Jordán D, Del Río P, Peñasco C. Household electricity demand in Spanish Regions. Public policy implications. Doc Treb l'IEB 2014.
[21] Energía EV de la. Euskadi energia 2016. Ente Vasco de la Energía (EVE); 2017.
[22] IHOBE. Elaboración de escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el País Vasco. Bilbao: 2017.
[23] Venäläinen A, Tammelin B, Tuomenvirta H, Jylhä K, Koskela J, Turunen MA, et al. The influence of climate change on energy production & heating energy demand in Finland. Energy Environ 2004;15:93–109.
[24] Red Eléctrica de Espana. Atlas de la Demanda Electrica Española. Madrid, Spain: Red Eléctrica de España; 1998.
[25] Moral-Carcedo J, Vicéns-Otero J. Modelling the non-linear response of Spanish electricity demand to temperature variations. Energy Econ 2005;27:477–94. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2005.01.003.
[26] Blázquez L, Boogen N, Filippini M. Residential electricity demand for Spain : new empirical evidence using aggregated data. CEPE Work Pap 2012.
[27] Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, et al. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1038/446727a.
[28] Red Eléctrica de España. The Spanish Electricity System 2017. Madrid, Spain: Red Eléctrica de España; 2018.
[29] Ente Vasco de la Energía E. Claves energéticas del sector doméstico en Euskadi. Bilbao: Ente Vasco de la Energía (EVE); 2013.
[30] Labandeira X, Labeaga JM, López-Otero X. Energy Demand for Heating in Spain : An Empirical Analysis wiith Policy Purposes Energy Demand for Heating in Spain : An Empirical Analysis with Policy Purposes. Econ Energy 2011;6.
[31] IDAE. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Madrid, Spain: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE); 2011.
[32] Peel MC, Finlayson BL, Mcmahon TA. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrol Earth Syst Sci Discuss Eur Geosci Union 2007;11 (5):1633–44.
[33] Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol Zeitschrift 2006;15:259–63. DOI: http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130.
[34] AEMET/IMP. Atlas climático Ibérico - Iberian climate Atlas. 2011th ed. Madrid, Spain: Agencia Estatal de Meteorología; n.d.
[35] Sánchez Durán R (coord). Energía y Ciudades, Madrid, Spain: Club Español de la Energía; 2017.
[36] Vasco G, Energía EV de la. Estrategia Energética de Euskadi 2030. Vitoria-Gasteiz: EVE; 2017.
[37] European Commission. Energy Roadmap 2050. COM(2011), Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2012, p. 1–24. DOI: http://dx.doi.org/10.2833/10759.
[38] Rubel F, Kottek M. Observed and projected climate shifts 1901 – 2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. Meteorol Zeitschrift 2010;19:135–41. DOI: http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430.
[39] Jaglom WS, McFarland JR, Colley MF, Mack CB, Venkatesh B, Miller RL, et al. Assessment of projected temperature impacts from climate change on the U.S. electric power sector using the Integrated Planning Model®. Energy Policy 2014;73:524–39. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.032.
[40] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers. IPCC, 2014 Clim Chang 2014 Synth Report Contrib Work Groups I, II III to Fifth Assess Rep Intergov Panel Clim Chang [Core Writ Team, RK Pachauri LA Meyer (Eds)] IPCC, Geneva, Switzer 2014:31. DOI: http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324.

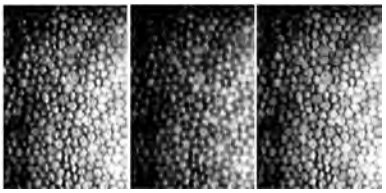
AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Agencia Vasca de Energía por proporcionar datos sobre el consumo de electricidad en el País Vasco y a Cristina Rivero (CEOE) y Rafael Sánchez Durán (ENDESA) por sus ideas y sugerencias. Mario Soliño, Sonia Quiroga, Itxaso Gómez e Iker Larrea contribuyeron a la redacción de este documento. Eider de Miguel, Elene Olamika y Sofía Ordozgoiti ayudaron en el procesamiento de datos climáticos y económicos. Los autores siguen siendo los únicos responsables de cualquier error u omisión. Helen Poliquin ayudó a preparar la versión en inglés del manuscrito y José Manuel Correa la traducción española.

MATERIAL SUPLEMENTARIO.

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9344-1.pdf

Procesado automático de imagen aplicado al conteo y caracterización de la forma de células endoteliales corneales



Automatic image processing applied to corneal endothelium cell count and shape characterization

José Velázquez-Blázquez[1], Francisco Cavas[1], Victor Campuzano[1], Jorge Alió-del-Barrio[2,3], Francisco Fernández-Cañavate[1] y Jorge Alió[2,3]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena. Dpto. de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica. Campus Muralla del Mar. C/ Doctor Fleming, s/n - 30202 Cartagena (España)
[2] Unidad de Queratocono. Vissum. C/ Cabañal, 1 - 03016 Alicante (España)
[3] Universidad Miguel Hernández de Elche. Departamento de Oftalmología. Avenida Joan Carles I, 2- 03203 Elce, Alicante (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9275 | Recibido: 31/05/2019 • Inicio Evaluación: 04/06/2019 • Aceptado: 20/09/2019

ABSTRACT

- Corneal endothelium cell count, as well as cell hexagonality percent characterization, are of great importance nowadays to detect anomalies and pathologies of human eye, such as glaucoma. Prevalent technologies used are mainly based in both microscopy and a later image analysis. However, automatic cell count made by microscopes' built-in software is rather inconsistent, therefore many laboratories opt for using manual count as the most reliable alternative. This count is a tedious and time-consuming task, that can lead to human error, for this reason, several proposals to automate the process have been made. Present communication shows a procedure for the automatic pre-processing, segmentation and analysis of the images obtained by a confocal microscope, using watershed transform, and the graphics user interface (GUI) created with Matlab® to apply this procedure. In order to quantify the procedure's quality, 30 corneal endothelium images with a number of cells between 90 and 170 were analysed, resulting in a mean error in cell count of 4.3%, which can be considered a reasonably good result. However, results achieved for hexagonality percent using this method, and with the available image quality, are not as good as expected, which invites to improving image quality, focusing in areas with better cell homogeneity or even considering the application of other algorithms, such as neural networks, for future works.
- **Keywords:** Graphics User Interface (GUI), Hexagonality, Watershed, Opening-Closing by reconstruction (OCBR).

RESUMEN

El conteo de células del endotelio corneal, así como la caracterización de su porcentaje de hexagonalidad, cuentan con gran importancia en la actualidad para la detección de anomalías y patologías del ojo humano, tales como el glaucoma. Las tecnologías más usadas actualmente se basan tanto en la microscopía como en un posterior análisis de imagen. Sin embargo, el conteo automático de células realizado por el software integrado en el propio microscopio es bastante inconsistente, por lo que muchos laboratorios optan por usar el conteo manual como alternativa más fiable. Este conteo manual es una tarea ardua y tediosa, que puede dar lugar a errores humanos, por lo que se han realizado diversas propuestas para automatizar el proceso. Esta comunicación presenta un procedimiento para el pre-procesado, segmentación y análisis automático de las imágenes obtenidas por el microscopio confocal, mediante la transformada watershed y el interfaz gráfico de usuario (GUI) creado con Matlab® a tal efecto. A fin de cuantificar la calidad del proceso, se analizaron 30 imágenes del endotelio corneal con un número de células de entre 90 y 170, resultando en un error medio en el conteo del 4.3%, lo que puede considerarse un resultado razonablemente bueno. Sin embargo, los resultados logrados para el porcentaje de hexagonalidad mediante este método no fueron tan buenos como se esperaba, lo que invita a mejorar la calidad de imagen, centrándose en áreas con una mayor homogeneidad celular, o incluso a considerar la aplicación de otros algoritmos, tales como las redes neuronales, para futuros trabajos.

Palabras clave: Matlab®, Interfaz Gráfica de Usuario (GUI), Hexagonalidad, Watershed, Opening-Closing by reconstruction (OCBR).

1. INTRODUCCIÓN

La cornea es un tejido conectivo transparente y avascular compuesto de cinco capas diferenciadas, tres celulares (epitelio, estroma y endotelio) y dos interfases (la membrana de Bowman y la membrana de Descemet) [1].

De entre ellas, el endotelio es la capa responsable de mantener una hidratación constante (y por tanto la transparencia), presentando en su forma no degradada un aspecto de mosaico hexagonal que recuerda a un panal de abejas [2]. Por el proceso natural de envejecimiento, así como por ciertas patologías o disfunciones, tanto el número de celdas como su forma van cambiando a lo largo de la vida, de 3000/4000 células/cm^2 en la segunda década de vida hasta unas 2600 células/cm^2 al sobrepasar la octava. El número de celdas con forma hexagonal se modifica de forma similar, desde aproximadamente el 75% hasta solo el 60% del total [1,3].

Esta reducción del número de celdas crea huecos que fuerzan al resto de células a aumentar su tamaño (polimegatismo) y/o perder su forma hexagonal (pleomorfismo) para rellenarlos [1,4], de ahí la gran importancia del conteo de células y la caracterización de su forma para detectar algunas anomalías.

Las técnicas de procesado de imagen, así como las usadas en modelado geométrico, son de uso común en el campo de la oftalmología para la caracterización de las distintas estructuras y tejidos corneales. Todas ellas ayudan a detectar, diagnosticar, controlar y tratar distintas patologías, tales como retinopatías, glaucoma

o queratocono, así como a caracterizar sus distintos grados [5-14].

Actualmente, existen numerosas técnicas para el análisis de las células endoteliales corneales, como los basados en la microscopía especular y la microscopía confocal. Estas son las técnicas más usadas, sobre todo por su bajo riesgo de generar lesiones epiteliales o infecciones (no existe contacto con el ojo) y la facilidad de uso de sus softwares [15-18].

Sin embargo, muchos autores destacan la inconsistencia del conteo automático de células realizado por el software propio de estos microscopios [4,16,17,19-21]. Por esta razón, muchos laboratorios y clínicas optan por usar el conteo de células manual como alternativa más confiable.

El conteo manual es una tarea ardua y tediosa que puede generar errores humanos. Por esta razón, se han desarrollado diversas propuestas de automatización del proceso de conteo y caracterización de la forma y tamaño de las células epiteliales. Todas ellas se basan en pre-procesar la imagen obtenida del microscopio, pero cada una lo hace con un enfoque distinto: aprendizaje automático no supervisado [4], algoritmos genéticos [19], optimización por serpiente o nubes de partículas [22] o redes neuronales [21,23], entre muchos otros, aunque cabe destacar que cada una tiene sus inconvenientes.

El presente artículo muestra un procedimiento para el preprocesado, segmentación y análisis automático de imágenes obtenidas por microscopio confocal. Para aplicarlo, se ha usado la transformada Watershed, y una interfaz gráfica de usuario (GUI) creada con Matlab®, que componen conjuntamente una forma más cómoda y eficiente de contar las células endoteliales, así como de medir su porcentaje de hexagonalidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. PARTICIPANTES

Se usaron para este estudio un total de 30 imágenes de ojos de 30 pacientes (11 hombres / 19 mujeres, con edades comprendidas entre los 21 y los 52 años). Estas imágenes se seleccionaron aleatoriamente de la base de datos de fotos de endotelios de pacientes tomadas con un Konan NSP-9900 (Konan Medical, Hyogo, Japón) en la clínica Vissum (un centro asociado con la Universidad Miguel Hernández de Alicante, España). Las fotos fueron tomadas por un técnico experto, siguiendo los estándares éticos marcados por la Declaración de Helsinki (séptima edición, octubre 2013, Fortaleza, Brasil) y contando con la aprobación del Comité Ético de Investigación Clínica local, y el consentimiento informado de los pacientes.



Fig. 1: Diagrama de flujo del procedimiento

2.2. SOFTWARE

El entorno de programación para los algoritmos de filtrado de imagen y detección de células, así como para la creación de la GUI, fue el software comercial Matlab® R2017b (MathWorks®, Natick, EEUU). Matlab® es una poderosa herramienta para el tratamiento de imágenes, ya que puede descomponerlas y tratarlas como matrices. El diagrama de flujo del proceso puede observarse en la Fig. 1.

El microscopio confocal Konan NSP-9900 usa su propio software (CellCheck®) para obtener imágenes del endotelio, permitiendo su exportación en múltiples formatos, habiéndose elegido el estándar .JPG para la importación a la GUI diseñada.

2.3. PRE-PROCESADO

Región de Interés (ROI). Tras seleccionar la imagen, el primer paso consiste en seleccionar una ROI dentro de la cual el proceso tendrá lugar. Para ello, se usa la función *roipoly* de la librería de Matlab®, permitiendo la creación de una ROI poligonal y obteniendo una máscara de filtrado. A continuación, se obtiene el complementario de la máscara con la función *imcomplement*, se transforma a formato escala de grises (uint8) usando *im2uint*, y finalmente, el polígono transformado en máscara en escala de grises es añadido a la imagen original, pixel a pixel, por saturación, con *imadd*.

Ecualización de Histograma. Para distinguir mejor las regiones interiores de las celdas de sus bordes, el método elegido fue la ecualización y expansión automática del histograma, que se realiza en Matlab® con la función *histeq*.

Filtro de Mediana. Para eliminar el ruido y suavizar los detalles, se consideraron distintos filtros tales como el de Media, de Gauss o Binomial, optándose finalmente por aplicar el filtro de Mediana mediante la función de Matlab® *medfilt2*.

2.4. SEGMENTACIÓN

Para lograr una segmentación exitosa de las imágenes usando la transformada Watershed, es necesario que previamente se den varios pasos que permitan establecer marcas (masas de píxeles conectados) en los objetos.

Opening-Closing by reconstruction. De la gran variedad de procedimientos que se pueden usar para "limpiar" la imagen, se seleccionó la técnica morfológica conocida como Opening-Closing by reconstruction (OCBR). Esta operación crea regiones de intensidad máxima dentro de cada objeto, de modo que puedan ser detectadas posteriormente. El procedimiento seguido para realizar esta técnica se apoya en las siguientes funciones de Matlab®:

1. Erosión de la imagen con *imerode* y un kernel con forma de disco previamente definido con *strel*.
2. Reconstrucción de la imagen erosionada con *imreconstruct*.
3. Dilatación de la imagen con *imdilate* y un operador de convolución con forma de disco como el del paso 1, creado con *strel*
4. Reconstrucción de la imagen dilatada con *imreconstruct*.
5. Complementación del resultado con *imcomplement*.
6. Segundo filtrado por Mediana y erosión de bordes para remarcarlos y separar las regiones que todavía quedan unidas.

Detección de Regiones. Para detectar las regiones interiores de las células se usó la función *imregionalmax*, detectando grupos de 4 píxeles vecinos conectados cuya intensidad fuera máxima.

Para eliminar los grupos de píxeles pequeños restantes, se aplicó la función *bwareaopen*. Finalmente, para asemejar las regiones de máxima intensidad a las regiones interiores de las células, se llevó a cabo un cierre morfológico de la imagen binaria con la función *imclose*, mediante un operador de convolución con forma de disco y radio de 3 píxeles.

Transformada Watershed. Para obtener la distancia entre objetos necesaria para aplicar la transformada Watershed, se usó la función *bwdist* con distancia Cuasi-Euclídea, forzando por tanto a que la forma de las células tendiera a un hexágono, en lugar de a una circunferencia. A continuación, se hizo la transformada Watershed mediante la función *watershed*, seleccionando solamente los valores más altos del resultado (image == 0).

2.5. ANÁLISIS: NÚMERO DE CÉLULAS Y HEXAGONALIDAD

El principal objetivo de este estudio es obtener el número de células en una imagen del endotelio corneal, así como su porcentaje de hexagonalidad, ya que estas características son usadas para el diagnóstico de enfermedades corneales. Para ello, se han usado los siguientes métodos:

Etiquetado. Para obtener el valor de la densidad celular, el método de etiquetado se aplicó mediante la función de Matlab® *bwlabel*, que devuelve el número de objetos etiquetdos en la imagen.

Porcentaje de Hexagonalidad. Para obtener el porcentaje de hexagonalidad, se optó por un enfoque matemático, definiendo la hexagonalidad como la cercanía de la ratio área/perímetro^2 a la de un hexágono regular en cada célula. Esta constante de los polígonos regulares es independiente del tamaño y para un hexágono regular toma el valor 0.07216875. Para su cálculo, se utilizó la función *regionprops* a fin de adquirir el área y el perímetro de todos los objetos previamente etiquetados. Una vez calculada la constante de cada célula, el error cuando se compara con la constante del hexágono perfecto se obtiene por medio de un código de desarrollo propio. Por tanto, este error expresa el porcentaje de hexagonalidad para cada célula, y se muestra finalmente en la GUI en forma de histograma, junto con el valor medio de porcentaje de hexagonalidad de todas las células, como se puede observar en la sección de Material Suplementario (Fig. 1).

2.6. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

Para obtener un diseño legible e intuitivo, la paleta de colores se homogeneizó a blanco, y toda la GUI se estructuró colocando cada objeto de forma equidistante y simplificando los botones y/o opciones, así como la información mostrada. La GUI diseñada permite la apertura de una imagen, mostrar su histograma, detectar las células y calcular el número de ellas y su porcentaje de hexagonalidad, tanto de forma individual como en forma de valor medio. La Fig. 1 de la sección de Material Suplementario muestra el diseño final de la GUI creada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos sugieren que en cada caso es indispensable la adquisición de una ROI de la imagen, ya que suelen existir habitualmente diferencias de contraste, regiones en las que las células no son homogéneas o en las que sus bordes se mezclan, entre otras imperfecciones. El resultado de la selección de la ROI y la imagen original pueden verse en la sección de Material Suplementario (Fig. 2).

Con el fin de mejorar el contraste de la imagen, en una etapa inicial se probaron filtros de ajuste de brillo y de mejora lineal de bordes, con resultados no muy satisfactorios ya que existe un gran contraste entre las zonas oscuras adyacentes a zonas muy claras. Para hacer que el programa funcione con la mayoría de imágenes, ha sido necesario ecualizar el histograma para mejorar el contraste entre las zonas interiores de las células y sus bordes. Los resultados pueden verse en la sección de Material Suplementario (Figs. 3 y 4).

Dado que el ruido presente en las imágenes suele estar causado por la presencia aleatoria de píxeles totalmente blancos, la aplicación del filtro de mediana reduce la cantidad de variaciones de intensidad entre píxeles vecinos, e incluso elimina aquellos cuyo nivel de intensidad es muy diferente, consiguiendo un suavizado de la imagen sin eliminar detalles importantes, tales como los bordes, como puede observarse en la sección de Material Suplementario (Fig. 5).

El método de segmentación OCBR se ha comprobado crítico para la obtención del número de células endoteliales corneales, ya que homogeniza casi en su totalidad la región interior de ellas. El resultado, paso a paso, de la operación morfológica de Opening-Closing by Reconstruction puede comprobarse en las Figs. 2 y 3.

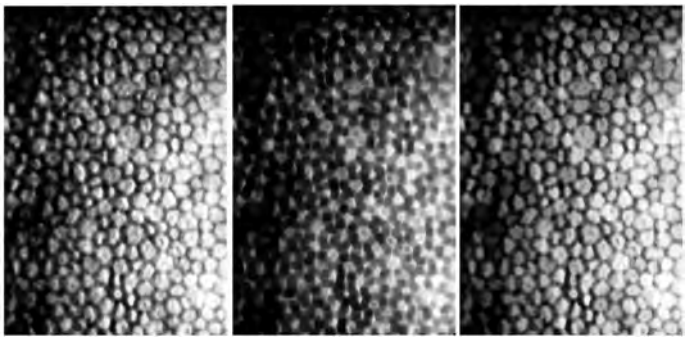


Fig. 2: Imagen antes de erosionar (izq.), tras erosionar (centro) y tras reconstrucción (drcha.)

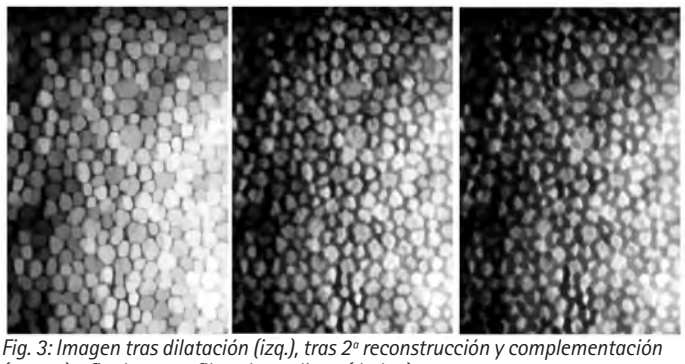


Fig. 3: Imagen tras dilatación (izq.), tras 2º reconstrucción y complementación (centro) y final, tras 2º filtro de mediana (drcha.)

El método para la detección de las regiones máximas funciona correctamente, aunque sus resultados dependen en gran manera de la segmentación previa y de la calidad de la imagen original. Los resultados de las operaciones *imregionalmax*, *bwareaopen* y *imclose* se muestran en la Fig. 4.

Aunque muchos otros algoritmos de detección de bordes se ensayaron, tales como "sobel", "prewitt" o "canny", se optó finalmente por usar la transformada Watershed con distancia Cuasi-Euclídea, ya que proporciona resultados que recuerdan mucho a una forma hexagonal, que es la forma ideal de las células endoteliales corneales.

El método de etiquetado contó siempre la totalidad de células previamente detectadas por la segmentación, por lo que el error

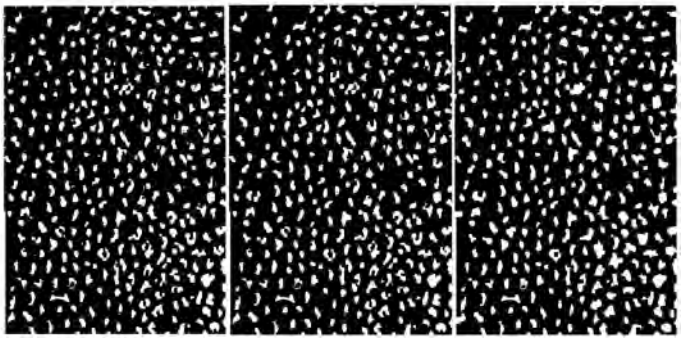


Fig. 4: Imagen tras aplicar imregionalmax (izq.), bwareaopen (centro) y imclose (drcha.)

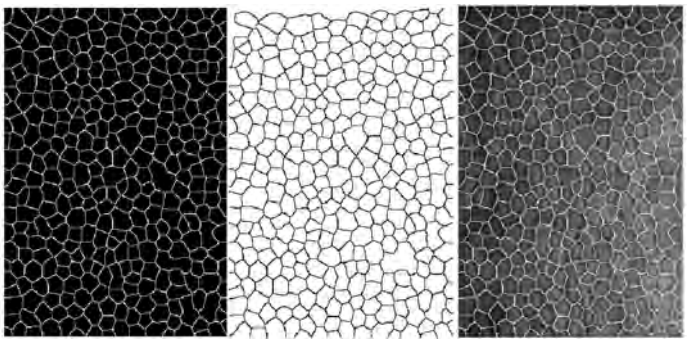


Fig. 5: Resultado de la transformada Watershed (izq.), su imagen complementaria (centro) y su superposición sobre la imagen original (drcha.)

se reduce a aquel producido por la segmentación en sí misma. En este caso, la imagen usada para el conteo de células es la complementaria del resultado de la transformada Watershed (Fig. 5), ya que la función usa las regiones etiquetadas de imagen binaria cuyo valor de pixel es igual a 1.

Para cuantificar la calidad de la segmentación realizada, se analizaron 30 imágenes con los algoritmos programados, con un número de células en la ROI de entre 90 y 170. (Fig. 6). Para estimar el error cometido durante el conteo, se consideró la medida manual como el valor exacto, y a continuación se contabilizó la desviación respecto a ella con el conteo automático, con la siguiente ecuación:

$$E_i = \frac{C_a \cdot 100}{C_m} \qquad (1)$$

Donde E_i es el error en cada medida, C_m es el total de células medidas manualmente, y C_a es el total de células medidas de forma automática.

Tras contar las células endoteliales tanto manual como automáticamente, el error medio obtenido entre ambos procedimientos fue del 4.3 % (desviación estándar: ±2.9 %), que puede considerarse un resultado razonablemente bueno (Fig. 7). Los casos en los que el error fue superior al 10% correspondieron siempre a casos en los que la calidad de imagen era mala y/o existía alta variabilidad en el tamaño/forma de las células.

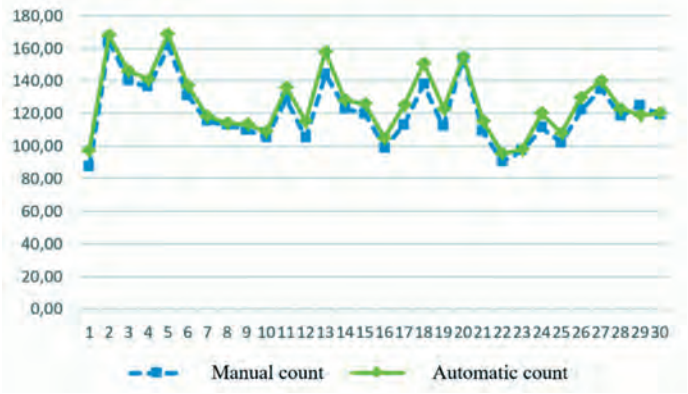


Fig. 6: Número de células contadas en modo automático vs. modo manual

Para determinar el error medido en el porcentaje de hexagonalidad, procedimos de forma similar, considerando la medida manual como referencia, y comparándola con la automática:

$$H_i = \frac{P_a \cdot 100}{P_m} \qquad (2)$$

Donde H_i es el error en la hexagonalidad en cada medida, P_m es el porcentaje de hexagonalidad medido manualmente y P_a es el porcentaje de hexagonalidad medido automáticamente. En este caso, el error medio obtenido fue superior al 16 % (desviación estándar: ±8.8 %), por lo que es preciso un estudio posterior para su reducción (Fig. 8):

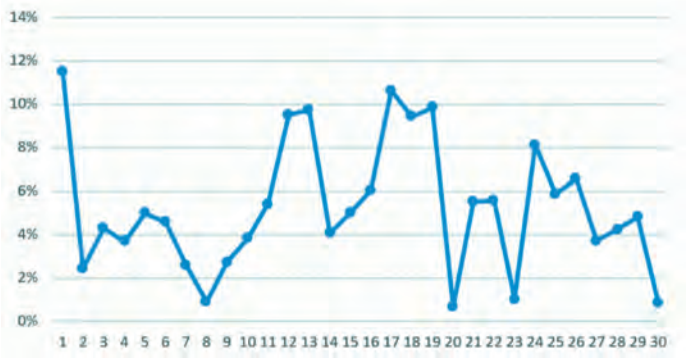


Fig. 7: Error de conteo de células en modo automático

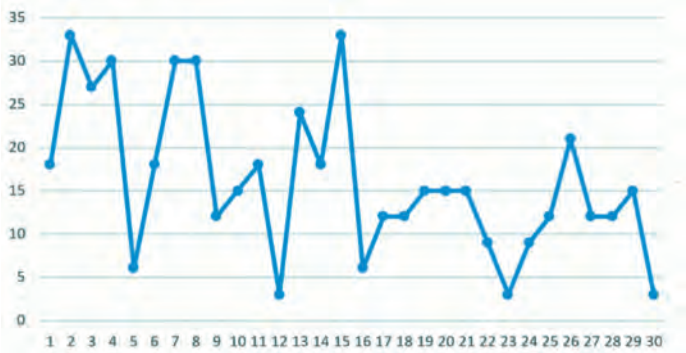


Fig. 8: Error de conteo de porcentaje de hexagonalidad en modo automático

4. CONCLUSIÓN

En este trabajo se han programado una serie de algoritmos con el software Matlab®, con objeto de obtener algunas de las principales características del endotelio corneal: densidad de células y porcentaje de hexagonalidad. Para facilitar la programación, se diseñó una GUI, programada también en Matlab®, para la importación de imágenes y visualización de los resultados de análisis.

Se ha logrado el objetivo de diseñar y programar tanto la GUI como varios algoritmos de detección de células que permiten la reducción del tiempo de análisis y evitan los errores humanos cuando se usa el software del microscopio confocal. Sin embargo, se ha detectado que la calidad y las características de las imágenes originales afectan considerablemente el nivel de error.

Los resultados obtenidos para el cálculo del número de células son satisfactorios, mostrando un error medio bajo, lo que concuerda con los resultados obtenidos mediante otros enfoques: aprendizaje automático no supervisado [4], algoritmos genéticos [19] optimización por serpiente o nube de partículas [22] o redes neuronales [21,23]. Sin embargo, los resultados logrados para el porcentaje de hexagonalidad usando este método y con la calidad de las imágenes disponibles, no es tan bueno como cabría esperar, ya que el valor medio de las variaciones entre conteo manual y automático alcanza el 16%, por lo que precisa de futura investigación.

Los resultados obtenidos con este procedimiento pueden ser usados para analizar las características de la córnea de diversas enfermedades corneales, obteniéndose nuevos datos estadísticos representativos de las imágenes e incluso mejorando las imágenes obtenidas de otros tipos de células.

Para futuros trabajos, la calidad de las imágenes a analizar podría ser mejorada, así como podría homogeneizarse su tamaño, para lograr una total automatización del proceso. Además, el mismo método de segmentación debería seguir siendo evaluado con imágenes de mejor calidad, áreas con forma de células más homogénea, pudiendo también probarse nuevos algoritmos de programación, como las redes neuronales.

REFERENCIAS

[1] DelMonte DW, Kim T (2011) Anatomy and physiology of the cornea. Journal of Cataract and Refractive Surgery 37 (3):588-598. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2010.12.037
[2] Piorkowski A, Nurzynska K, Gronkowska-Serafin J, Selig B, Boldak C, Reska D (2017) Influence of applied corneal endothelium image segmentation techniques on the clinical parameters. Computerized Medical Imaging and Graphics 55:13-27. doi: https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2016.07.010
[3] Contreras-Corona RG, Anaya-Pava EJ, Gallegos-Valencia AJ, Villarreal-Maíz JA (2014) Densidad y morfología de células del endotelio corneal en adultos jóvenes del norte de México. Revista Mexicana de Oftalmología 88 (3):99-103. doi: https://doi.org/10.1016/j.mexoft.2014.02.002
[4] Kiran Kumar K, Srinivasa G Comeal Endothelium cell segmentation and count using K-means and watershed algorithms. In: Proceedings of 2018 2nd International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications, ICAECC 2018, 2018. doi: https://doi.org/10.1109/ICAECC.2018.8479526
[5] Nitschke C, Nakazawa A (2017) Corneal Imaging. In: The Wiley Handbook of Human Computer Interaction Set, vol 1. pp 445-514. doi: https://doi.org/10.1002/9781118976005.ch21
[6] Ng EYK, Tan JH, Acharya UR, Suri JS (2012) Human eye imaging and modeling. Human Eye Imaging and Modeling. doi:10.1201/b12081
[7] Cavas-Martínez F, Fernández-Pacheco DG, De La Cruz-Sánchez E, Nieto Martínez J, Fernández Cañavate FJ, Vega-Estrada A, Plaza-Puche AB, Alió JL (2014) Geometrical custom modeling of human cornea in vivo and its use for the diagnosis of corneal ectasia. PLoS ONE 9 (10). doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110249
[8] Juanes JA, Ruisoto P, Prats-Galino A, Framiñán A, Riesco JM (2014) Computed anatomical modelling of the optic pathway and oculomotor system using magnetic resonance imaging. Journal of Neuroradiology 41 (3):168-176. doi: https://doi.org/10.1016/j.neurad.2013.06.005
[9] Ng EYK, Rajendra Acharya U, Rangayyan RM, Suri JS (2014) Ophthalmological imaging and applications. Ophthalmological Imaging and Applications. doi: https://doi.org/10.1201/b17026
[10] Cavas-Martínez F, Fernández-Pacheco DG, Parras D, Cañavate FJF, Bataille L, Alió J (2018) Study and characterization of morphogeometric parameters to assist diagnosis of keratoconus. BioMedical Engineering Online 17. doi: https://doi.org/10.1186/s12938-018-0564-7
[11] Cavas-Martínez F, Bataille L, Fernández-Pacheco DG, Cañavate FJF, Alio JL (2017) Keratoconus Detection Based on a New Corneal Volumetric Analysis. Scientific Reports 7 (1). doi: https://doi.org/10.1038/s41598-017-16145-3
[12] Cavas-Martínez F, Fernández-Pacheco DG, Cañavate FJF, Velázquez-Blázquez JS, Bolarín JM, Alió JL (2018) Study of morpho-geometric variables to improve the diagnosis in Keratoconus with mild visual limitation. Symmetry 10 (8). doi: https://doi.org/10.3390/sym10080306
[13] Cavas Martinez F, Garcia Fernandez-Pacheco D, Fernandez Cañavate FJ, Velázquez Blázquez JS, Bolarin JM, Tiveron M, Alio JL (2019) Detección De Queratocono Temprano Mediante Modelado 3D Personalizado Y Análisis De Sus Parámetros Geométricos. Dyna Ingenieria E Industria 94 (1):175-181. doi: https://doi.org/10.6036/8895
[14] Cavas Martinez F, Fernandez Pacheco D, De La Cruz Sanchez E, Nieto MartÍNez J, Fernandez CaÑAvate FJ, Alio J (2015) MODELADO VIRTUAL DE UNA ESTRUCTURA BIOLOGICA: LA CORNEA HUMANA. DYNA Ingenieria e Industria; Vol 90, No 6 (2015). http://dx.doi.org/10.6036/7689
[15] Huang J, Maram J, Tepelus TC, Sadda SR, Chopra V, Lee OL (2017) Comparison of Noncontact Specular and Confocal Microscopy for Evaluation of Corneal Endothelium. Eye and Contact Lens. doi: https://doi.org/10.1097/ICL.0000000000000362
[16] Szalai E, Németh G, Berta A, Módis L (2011) Evaluation of the corneal endothelium using noncontact and contact specular microscopy. Cornea 30 (5):567-570. doi: https://doi.org/10.1097/ICO.0b013e3182000807
[17] Huang J, Maram J, Tepelus TC, Modak C, Marion K, Sadda SR, Chopra V, Lee OL (2018) Comparison of manual & automated analysis methods for corneal endothelial cell density measurements by specular microscopy. Journal of Optometry 11 (3):182-191. doi: https://doi.org/10.1016/j.optom.2017.06.001
[18] Karaca I, Yilmaz SG, Palamar M, Ates H (2018) Comparison of central corneal thickness and endothelial cell measurements by Scheimpflug camera system and two noncontact specular microscopes. International Ophthalmology 38 (4):1601-1609. doi: https://doi.org/10.1007/s10792-017-0630-3
[19] Scarpa F, Ruggeri A (2016) Development of a reliable automated algorithm for the morphometric analysis of human corneal endothelium. Cornea 35 (9):1222-1228. doi: https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000000908
[20] Maruoka S, Nakakura S, Matsuo N, Yoshitomi K, Katakami C, Tabuchi H, Chikama T, Kiuchi Y (2018) Comparison of semi-automated center-dot and fully automated endothelial cell analyses from specular microscopy images. International Ophthalmology 38 (6):2495-2507. doi: https://doi.org/10.1007/s10792-017-0760-7
[21] Fabijańska A (2019) Automatic segmentation of corneal endothelial cells from microscopy images. Biomedical Signal Processing and Control 47:145-158. doi: https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.08.018
[22] Sharif MS, Qahwaji R, Shahamatnia E, Alzubaidi R, Ipson S, Brahma A (2015) An efficient intelligent analysis system for confocal corneal endothelium images. Computer Methods and Programs in Biomedicine 122 (3):421-436. doi: https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2015.09.003
[23] Elbita A, Qahwaji R, Ipson S, Sharif MS, Ghanchi F (2014) Preparation of 2D sequences of corneal images for 3D model building. Computer Methods and Programs in Biomedicine 114 (2):194-205. doi: https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2014.01.009

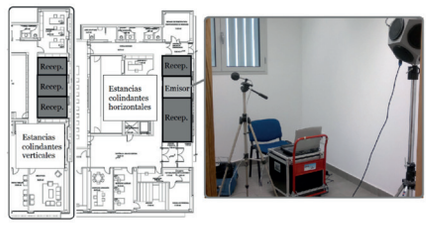
AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por la Red Temática de Investigación Cooperativa en Salud (RETICS-RD16/0008/0012), financiado por el Instituto de Salud Carlos III y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9275-1.pdf

Control del aislamiento acústico al ruido aéreo entre particiones interiores en obra terminada según la normativa CTE



Control of airborne sound insulation between interior partitions of the finished construction according to the standard CTE

Jose Ángel Gonzalez[1], Gregorio Blanco-Roldan[2], Jose Antonio Entrenas-Angulo[2] y Rafael-Rubén Sola-Guirado[3*]

[1] Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía. Calle Johan Gutenberg, 1 - 41092 Sevilla (España).
Universidad de Cordoba. Dpto. de Ingeniería Rural[2] y Dpto. de Ingeniería Mecánica[3]. Campus de Rabanales. Ctra. Nacional IV km 396 - 14014 Cordoba (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9176 | Recibido: 21/03/2019 • Inicio Evaluación: 25/03/2019 • Aceptado: 29/04/2019

ABSTRACT

• Updates on the Basic Document of Protection Against Noise (Dcc-DB-HR) (CTE, 8th April, 2016) in the section "Control of the finished construction" substituted the standard UNE EN ISO 140-4 by UNE EN ISO 16283-1, although after that, it was rectified to the use of the derogated standard. The present work focuses on the comparison between both standards and describes the main technical changes that will affect to both technicians and administration staff. 16 experimental measurement series were undertaken in public buildings with different purpose (sanitary, educational, cultural and administrative). Results obtained from the 'in situ' measurements comparing both standards showed no significant differences between the insulation values according the application of each standard.
Keywords: insulation; acoustic; in situ; public building, standard.

RESUMEN

Las actualizaciones en el Documento Básico de Protección Frente al Ruido (Dcc-DB-HR) (CTE, 8-4-2016), en su apartado "Control de la obra terminada", sustituyeron la aplicación de la norma UNE EN ISO 140-4 por la UNE EN ISO 16283-1, aunque poco después, se volvió a proponer la utilización de la norma derogada. El presente trabajo recoge una comparación entre ambas normas y describe los principales cambios técnicos que afectarían tanto a los técnicos como al personal de la administración. Se han realizado 16 tandas de medidas experimentales en edificios públicos de tipo sanitario, docente, cultural y administrativo. Los resultados obtenidos de la comparación de las medidas "in situ" entre ambas normas indican que los valores globales de aislamiento no varían de forma significativa según la aplicación de una u otra norma.

Palabras clave: aislamiento; acústico; in situ; edificios públicos; norma.

1. INTRODUCCIÓN

En la construcción de edificios es fundamental la realización de un diseño apropiado para que las características de insonorización acústica se adecúen al destino de la estancia. En este sentido, en los últimos años, se han aumentado las exigencias para la mejora del confort del ciudadano. Todo ha derivado en la aparición de una serie de normativas, tanto a nivel local o autonómico como nacional o comunitario, con objeto de prevenir, vigilar y regular el ruido transmitido entre recintos. Para efectuar un control adecuado, es necesario conocer los niveles de aislamiento, para lo cual se requiere estandarizar la toma de medidas.

Las regulaciones existentes exigen la obtención de medidas lo más fiables y reproducibles posibles, es decir con menos incertidumbre. Este es el caso, por ejemplo, del Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía [1], que regula el procedimiento de control para los valores de aislamiento acústico y que el promotor de un edificio debe presentar a los efectos de obtener la licencia de primera ocupación.

En 2009, entró en vigor el Real Decreto 1371/2007 de 19 de octubre que aprobó el Documento Básico de Protección Frente el Ruido DB-HR [2] y que forma parte del Código Técnico de la Edificación. Con ello, se regularon las exigencias de aislamiento acústico a través de las magnitudes acústicas referidas a las propiedades del edificio y, por tanto, pueden ser comprobables mediante ensayos "in situ".

En 2016, se publicó el documento actualizado con comentarios al CTE Dcc-DB HR [3], cuya primera versión fue publicada en 2011 con una revisión en 2015. En ella se indica que la aplicación de la norma UNE EN ISO 140-4 se sustituye por la aplicación de la UNE EN ISO 16283-1. Paralelamente, como guía de aplicación en las mediciones de aislamiento acústico al ruido aéreo entre recintos, se publicó el Documento de Apoyo (DA DB-HR/ 1): "Guía de uso de las magnitudes de aislamiento acústico en relación con las exigencias" [4].

Apenas dos meses después, en junio de 2016, el Ministerio de Fomento publicó la rectificación de ambos documentos: Documento actualizado de comentarios al CTE-DB HR [5], y Documento de Apoyo al DB-HR Protección frente al ruido (DA DB-HR/ 1) [6], indicando el motivo del nuevo cambio: "...conforme a lo establecido en el apartado III Criterios generales de aplicación, cuando se cita una norma UNE en el articulado debe entenderse que se hace referencia a la versión que se indica, aun cuando exista una versión posterior. Por lo que a efectos de la realización del Control de la obra terminada los ensayos se realizarán conforme a lo establecido en la norma UNE EN ISO 140-4".

Cabe resaltar, que todas las partes de la serie UNE EN ISO 140, donde la parte 4 corresponde a las medidas "in situ" del aislamiento a ruido acústico aéreo, están siendo derogadas y sustituidas [7]. Es necesario estudiar las implicaciones que tiene el uso de estas

Elemento	UNE-EN ISO 140-4	UNE-EN ISO 16283-1
Objeto y campo de aplicación		
Volúmenes de los recintos	No se cita específicamente	Desde 10 m^3 hasta 250 m^3
Condiciones de campo sonoro	Difuso	Puede o no aproximarse a un campo difuso
Procedimiento de medida		
Generalidades.	Un solo procedimiento	Dos procedimientos: por defecto y de baja frec
Procedimiento de medida. Fuente sonora		
Generación de campo sonoro en el recinto emisor.	No debe tener diferencias de nivel mayores de 6 dB entre bandas de tercio de octava adyacentes	*Idem.* 8 dB, al menos por encima de 100 Hz
Índices de directividad (DI_i)	De $\pm$ 2 a $\pm$ 8 dB (630-1000 Hz) y $\pm$ 8 dB (1000-5000 Hz).	$\pm$ 5 dB (800 Hz) y $\pm$ 8 dB (1000-5000 Hz).
Posiciones óptimas de la fuente.	Distancia al elemento de separación: 0.5 m	Distancia al elemento de separación: mínimo 1 m medida de un suelo en el recinto superior
Procedimiento de medida. Realización		
Medida según posiciones del micrófono.	Dos formas: (1) posiciones de micrófono fijas, (2) posiciones de micrófono móvil	Procedimiento por defecto: (1) posiciones de micrófono fijas, (2) micrófono de movimiento continuo mecanizado, (3) micrófono de barrido manual. Procedimiento de baja frecuencia: micrófono en posición fija
Mediciones en las bandas de baja frec.	No cambia el procedimiento	Procedimiento específico
Procedimiento de medida. Tiempo de reverberación		
Medida.	Según norma ISO 354	Según norma ISO 3382-2 e ISO 18233
Rango de evaluación	No deberá ser menor que 20 dB	El rango preferido es de 20 dB
Mediciones en las bandas de baja frec.	No cambia el procedimiento	Procedimiento específico

Tabla 1: Principales aspectos de comparación entre las normas de medida del aislamiento acústico

regulaciones. En la Tabla 1, se expone una comparación entre algunas de estas implicaciones.

1.1. IMPLICACIONES DE LAS NORMATIVAS DE MEDICIÓN

En la norma UNE EN ISO 140-4:1999 [8] se exponían con detalle los materiales y métodos a seguir, los equipos necesarios para la realización de medidas, el detalle de las posiciones (fuente y receptores), las características del ruido generado en el recinto emisor (estacionario), el procedimiento para conseguir un campo sonoro lo más difuso posible y las correcciones necesarias debido al ruido de fondo, así como otras indicaciones. Para la obtención de los índices globales y los diferentes términos de adaptación espectral, se complementa con la norma UNE EN ISO 717-1 [9]. Más tarde, se inicia una revisión de la norma ISO 717 [10], que tal y como expuso Rassmussen [11-13], pretendía reducir el gran número de índices diferentes de aislamiento que existen en Europa. Parte de ello, motivó la sustitución de la norma UNE EN ISO 140-4:1999, por la UNE EN ISO 16283-1:2014, y a su vez por la norma UNE-EN ISO 16283-1:2015.

La norma UNE EN ISO 140-4 especificaba la metodología de medida entre dos recintos bajo condiciones de campo sonoro difuso, cuando esto no es siempre así. En recintos rectangulares con superficies absorbentes no suele haber campos sonoros difusos, excepto para las medias y altas frecuencias. En la norma UNE EN ISO 16263-1 se subsana este hecho mediante la introducción de un procedimiento específico de medida para bajas frecuencias. Por tanto, es posible medir el aislamiento en recintos amueblados o vacíos, donde el campo sonoro puede, o no puede, aproximarse a un campo difuso. Este procedimiento específico aumenta esencialmente el tiempo de medición, con una medida adicional del nivel de presión sonora y del tiempo de reverberación para las bajas frecuencias.

Los procedimientos de medida indicados en la norma UNE EN ISO 140-4 tendían a una alta incertidumbre en bajas frecuencias [15]. Muchos de los recintos habitables, tienen pequeños volúmenes donde la variación espacial de los niveles de presión sonora aumenta considerablemente a bajas frecuencias, y con ello la incertidumbre de la medida. La norma, en su anexo informativo D, proponía aumentar las distancias mínimas de 0,5 m a 1-1,2 m para el rango de bajas frecuencias por debajo de los 100 Hz, pero ello es inviable en estos recintos pequeños. La nueva norma UNE EN ISO 16283-1 incluyó un procedimiento específico diferente para el muestreo del nivel de presión sonora en las frecuencias de tercio de octava de 50, 63 y 80 Hz, ya que son los valores centrales de dichos tercios de octava, en aquellas situaciones en las que el volumen del recinto sea inferior a 25 m3. Así, se reduce la incertidumbre de las medidas de aislamiento acústico en bajas frecuencias en estos pequeños recintos.

El nivel de presión sonora (L) medio de un recinto, se calcula a partir del valor medio de energía. La norma UNE EN ISO 140-4 estimaba el nivel de presión sonora usando únicamente las posiciones medias de la zona central del habitáculo, que están a una distancia mínima de 0,50 m de los límites del recinto. La norma UNE EN ISO 16283-1 permite el cálculo usando todas las posiciones posibles del micrófono dentro del recinto cerca de las paredes/suelos y las esquinas [15]. Debido a laboriosidad de ello y para reducir el tiempo de medida, es posible hacer una buena estimación del nivel de presión sonoro medio de bajas frecuencias, para las bandas de 50, 63 y 80 Hz, (LLF) (Ec. 1), combinando solamente medidas en cuatro de las esquinas del recinto (dos de ellas al nivel de suelo, y las otras dos a nivel de techo, pudiendo ser o no ser adyacentes a la partición común), conjuntamente con el nivel medio para la zona central del recinto.

$$L_{LF}(dB) = 10 \log \frac{10^{0,1\ L_{esquina}} + 2 \cdot 10^{0,1\ L}}{3} \quad (1)$$

Siendo:

- L (dB) el nivel de presión acústica promediado energéticamente, obtenido con el procedimiento por defecto, es decir para la zona central del recinto, sin corregir con ruido de fondo (emisor) o corregido con ruido de fondo (receptor).

- $L_{esquina}$ (dB): nivel de presión acústica más elevado del conjunto de esquinas medidas para cada una de las bandas de 50 Hz, 63 Hz y 80 Hz, obtenido con el procedimiento de bajas frecuencias sin corregir con ruido de fondo (emisor) o corregido con ruido de fondo (receptor).

Los tiempos de reverberación son difíciles de medir con exactitud en pequeños recintos para las bandas de tercio de octava por debajo de los 100 Hz. Esto es debido a que la densidad modal es muy baja, de modo que en cada tercio de octava aparecen pocos modos propios y en consecuencia dominan los del tiempo de extinción de cada modo específico, dando lugar a caídas no lineales. Para superar este problema, la norma UNE EN ISO 16283-1, propuso adoptar el procedimiento de baja frecuencia propuesto por Hopkins y Turner [15], el cual permite que el tiempo de reverberación se mida solamente en la banda de octava de 63 Hz, en lugar de en las tres bandas (50, 63 y 80 Hz); y que este único valor se use para representar cada una de estas tres bandas en el cálculo del índice de aislamiento acústico entre recintos interiores (D_{nT}) (Ec. 2).

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + \log\frac{T}{To} \quad (2)$$

Siendo:

- L1 (dB): nivel de presión acústica en el recinto fuente, promediado energéticamente (volumen recinto ≥ 25 m^3), o promediado energéticamente a baja frecuencia (volumen recinto ≤ 25 m^3), aplicando en este último caso la Ec. 1.
- L2 (dB): nivel de presión acústica en el recinto receptor, promediado energéticamente (volumen recinto ≥ 25 m^3), o promediado energéticamente a baja frecuencia (volumen recinto ≤ 25 m^3), aplicando en este último caso la Ec. 1.
- T (s): tiempo de reverberación del recinto receptor.
- T_0 (s): el tiempo de reverberación de referencia (0,5 s).

A partir de la Ec. 2, es posible obtener el índice de aislamiento global $D_{nT,A}$ definido, conforme al Código Técnico, como la diferencia de niveles estandarizada ponderada A, entre recintos interiores, y calculado mediante la Ec. 3 que sería el valor global, obtenido a partir de los valores de cada una de las frecuencias i, $D_{nT,i}$.

$$D_{nT,A} = -10\log\sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i} - D_{nT,i})/10} \quad (3)$$

Siendo:

- $D_{nT,i}$: (dB) diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencia i (Ec. 2).
- $L_{r,i}$ (dBA); valor del espectro normalizado y tabulado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i. El valor de este espectro está recogido en el Código técnico, así como en las normas correspondientes.
- i: recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz.

Por tanto, en el Código Técnico, no se disponen de valores de este espectro normalizado para las frecuencias de 50, 63 y 80 Hz. Para poder incorporar en la evaluación del aislamiento acústico las frecuencias por debajo de los 100 Hz y obtener el índice $D_{nT,A}$ (50-5000) se tiene en cuenta que los valores del espectro de referencia definidos por la propuesta de revisión de la ISO 717 [12] o de la vigente UNE EN ISO 717-1 [17] corresponden con un redondeo de los valores del espectro de referencia definidos por el DB-HR, menos por las frecuencias de 50, 63 y 80 Hz que no se consideran. Por tanto, para la obtención de este índice de aislamiento ampliado a bajas frecuencias $D_{nT,A}$ (50-5000), se pueden usar bien el espectro de referencia definido por la propuesta de revisión de la ISO 717 [12] o de la vigente UNE EN ISO 717-1 [17], o bien los valores del espectro de referencia, definidos por el DB-HR ampliado a estas bajas frecuencias.

Los valores equivalentes a los $D_{nT,A}$ son las denominadas diferencias globales de niveles estandarizados corregidos con el término de adaptación espectral C (D_{nTw}+C), para los rangos de frecuencia de 50 a 500 y de 100 a 5000. El valor de C, así como las ponderaciones globales del aislamiento según el método de la curva de referencia, designadas con el subíndice w, se calculan a través del procedimiento establecido en la UNE EN ISO 717-1 [9] que parte de los valores del índice $D_{nT,i}$ y usa curvas de referencia para su ajuste.

Este trabajo pretende comparar el efecto de considerar las magnitudes globales, considerando las bajas frecuencias o no, y el uso de ambas normas. Para discutir la incidencia de ambas normas y ambos índices se han realizado una serie de medidas in situ en recintos ubicados en diferentes edificios públicos de diferente su uso, con calidades similares, y construidos por una misma empresa constructora con los mismos procedimientos de ejecución y en el mismo período temporal. El objetivo es medir su nivel de aislamiento acústico al ruido aéreo y obtener las diferencias existentes entre los distintos índices comentados, $D_{nT,A}$ (50-5000) y $D_{nT,A}$ (100-5000), y a su vez, entre los equivalentes a la norma anterior D_{nTw}+C (50-5000) y D_{nTw}+C (100-5000).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. SISTEMA DE MEDIDA

Para las mediciones se han utilizado los siguientes sistemas:

- Sistema de generación del campo sonoro, formado por dos fuentes de ruido omnidireccionales dodecaédricas (Look Line Acustics, DL 301), amplificadores y generadores de ruido (Look Line Acustics, D 301)
- Sistema de adquisición y medida, formado por un micrófono prepolarizado de campo libre con preamplificador (Gras, 40AC), y un sonómetro (Harmonie,01 Db-Stell) conectado a un ordenador.
- Sistema y software de procesado (AM Acustics, dBBATI) para el análisis de los parámetros acústicos y los espectros de frecuencia.

Las medidas se han realizado con las dos fuentes, generando ruido rosa de forma simultánea mediante señales del mismo tipo y nivel, pero no correlacionadas entre sí. Para ello se utilizaron generadores y amplificadores distintos para cada una de las fuentes.

2.2. EDIFICIOS Y PARTICIONES

Las mediciones han sido llevadas a cabo en diferentes recintos ubicados en edificios públicos de nueva construcción de la comunidad autónoma de Andalucía, construidos por la misma empresa constructora. Los datos de los diferentes recintos ensayados, así como las soluciones constructivas, son especificadas en la Tabla 1, indicando el número de medidas realizadas en cada ensayo. La heterogeneidad de los recintos usados y los elementos que contemplan permitirá evaluar, con una casuística variada, si existen diferencias en lo que concierne al cambio en la técnica de medida "in situ" y en los índices según las diferentes normativas.

2.3. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Los ensayos se realizaron tomando medidas de aislamiento acústico en los diferentes recintos, utilizando posiciones fijas de

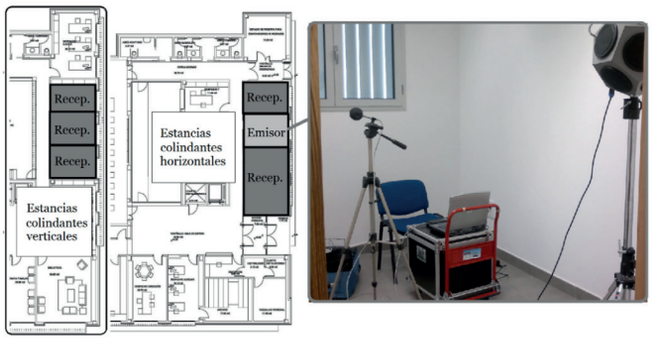


Fig. 1: Representación del recinto emisor en el edificio de tipo cultural usado en las medidas del aislamiento y parte del equipo de medida

micrófono en la zona central del recinto tal como se expone en la norma UNE EN ISO 140-4, así como en el procedimiento por defecto de la norma UNE EN ISO 16283-1; y a continuación, en aquellos recintos que le correspondían, se realizaron medidas según el procedimiento de bajas frecuencias (Fig. 1). Esto es, debido al tamaño de las estancias, se usó el método por defecto en todos los recintos, menos en el "despacho" que también se usó el método de esquina. Todos los procedimientos seguidos para la toma de medidas han sido los plasmados en ambas normas.

Previamente, se realizó una comprobación de la directividad de las dos fuentes omnidireccionales (Fig. 2), comprobando su idoneidad dentro de los límites establecidos: ±2 dB (100-300Hz), ±5 dB (800 Hz) y ±8 dB (1000- 5000Hz). Para ello los equipos se situaron en campo libre y en terreno no muy reflectante, siguiendo las pautas indicadas en el Anexo A de la norma UNE EN ISO 16283-1, colocando el punto central de la fuente y el micrófono enfrentados y a una altura de 1,5 m.

Después, se calculó el índice de directividad (DI) para su frecuencia (i) definido por la Ec. 4, mediante el cálculo de los diferentes niveles de presión sonora establecidos en la ecuación, para

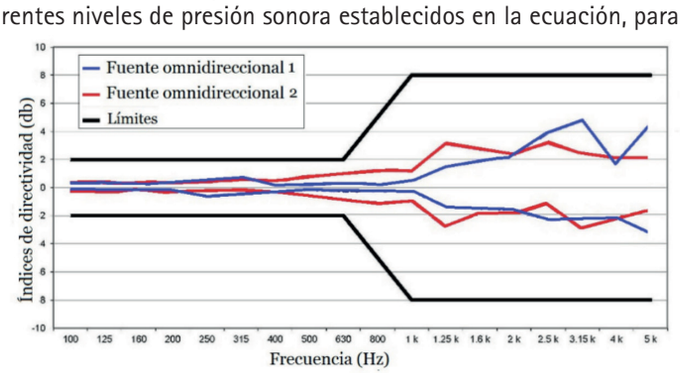


Fig. 2: Índices de directividad para las dos fuentes omnidireccionales empleadas en la toma de medidas de ruido

lo que se realizaron medidas discretas a intervalos de 5 grados y de 6 segundos de duración. La fuente se excitó con una señal de ruido rosa, con medidas en tercio de octava, y con un nivel lo suficientemente alto para que el ruido de fondo no afecte a la medida

$$DI_i = L_{360^\circ} - L_{30,i} \quad (4)$$

Siendo:

- L_{360° (dB): nivel de presión, promediado para los 360 grados.
- $L_{30,i}$ (dB): nivel de presión, promediado para 30 grados en la banda de frecuencia i.

Con los datos adquiridos, se calculó el índice de aislamiento acústico entre recintos interiores (D_{nT}). Finalmente, se obtuvieron los valores de los diferentes índices $D_{nT,A}$ (50-5000) y $D_{nT,A}$ (100-5000), así como sus equivalentes $D_{nTw}+C$ (50-5000) y $D_{nTw}+C$ (100-5000), calculados según sus diferentes normas con el procedimiento comentado.

3. RESULTADOS

Los valores obtenidos de aislamiento acústico en las distintas bandas de frecuencia (D_{nT}) y entre la tipología de recinto (sanitario, cultural, administrativo y docente) se muestran en la Fig. 3. Para estudiar las diferencias existentes se han calculado el promedio de los valores D_{nT} para cada banda de frecuencia obtenidos de los ensayos descritos en la Tabla 2, según cada tipología de recinto, y distinguiendo entre las medidas para cerramientos verticales y horizontales. Con estos valores se han calculado los coeficientes de variación como la relación de su desviación típica entre sus valores promedios (Fig. 4).

La Fig. 5 muestra las diferencias obtenidas, para todos los recintos ensayados, entre el índice de aislamiento ampliado a bajas frecuencias planteado por la norma UNE EN ISO 16283-1:2015, D_{nTA} (50-5000), y el índice definido en la actual normativa legal exigible, $D_{nT,A}$ (100-5000), que no contempla las bajas frecuencias, según los valores globales de la norma UNE EN ISO 717. Igualmente, se muestra la diferencia entre los índices $D_{nTw}+C$ (50-5000) y $D_{nTw}+C$ (100- 5000) que son su equivalente en la normativa anterior, UNE EN ISO 140-4. Los resultados de las magnitudes globales se resumen en la Tabla 3.

4. DISCUSIÓN

En los índices de aislamiento acústico D_{nT} (Fig. 3) se aprecian diferencias entre los niveles de aislamiento si el cerramiento es

Recinto emisor	Recinto receptor colindantes en la		Nº ensayo	Elemento constructivo			
	vertical	horizontal		Separación vertical	Forjado	Suelo flotante	Techo suspendido
Consulta. Edificio sanitario.		Consulta	1h,2h	Tipo 3	Reticular con losa de malla y hormigón	No	Sí
	Consulta		1v,2v,3v				
Despacho. Edificio cultural.		Despacho	3h,4h	Tipo 3	Reticular con losa de malla y hormigón	Sí	Sí
	Despacho		4v,5v,6v				
Oficina. Edificio administrativo.		Laboratorio	5h,6h	Tipo 1	Reticular con losa de malla y hormigón	No	Sí
	Despacho		7v				
Sala reuniones. Edificio docente.		Aula	7h	Tipo 3	Reticular con losa de malla y hormigón	No	Sí
	Despacho		8v,9v				

Tabla 2: Medidas realizadas entre las estancias de ensayo emisoras con sus anexas colindantes situadas en la vertical (cerramiento horizontal o forjados) y horizontal (cerramiento vertical o paredes) y descripción de los elementos constructivos que los conforman (según lo establecido en el CTE DB-HR).

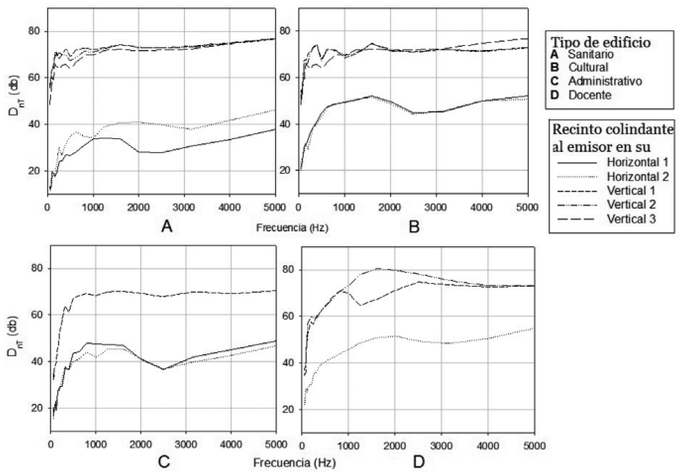


Fig. 3: Índices de aislamiento acústico D_{nT} medidos en distintos tipos de edificio (A, B, C, D) con diferente uso, con receptores en estancias colindantes horizontalmente (cerramiento vertical o paredes) y verticalmente (cerramiento horizontal o forjados).

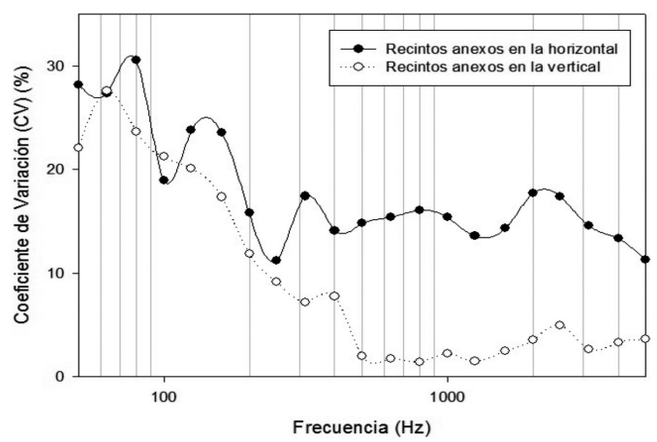


Fig. 4: Coeficiente de variación de los valores de índice D_{nT} obtenidos en los ensayos realizados en los recintos ensayados según su separación vertical o horizontal para el rango de frecuencias de 100 a 5000 Hz.

vertical u horizontal (curvas inferiores y superiores), coincidiendo con lo habitual en la construcción, donde los forjados suelen tener mayor nivel de aislamiento acústico. Cada uno de los recintos (sanitario, cultural, administrativo, docente) presenta un patrón diferente (Fig. 3), aunque con pequeñas diferencias, posiblemente atribuibles a las diferencias en la construcción de cada uno. Los coeficientes de variación de los D_{nT} entre tipos de recintos (Fig. 4) muestran que existen mayores diferencias en los cerramientos verticales, ya que como se ha comentado suelen presentar peor grado de aislamiento que los cerramientos horizontales. Cabe destacar, que las estancias del edificio sanitario (Fig.3) presentan mejor nivel de aislamiento acústico entre recintos anexos en la horizontal debido a la mejor solución constructiva o de ejecución.

En las bandas de bajas frecuencias se observa mayor variabilidad de los valores de aislamiento entre recintos, tanto para cerramiento vertical como horizontal (Fig. 4), y las diferencias de sus índices D_{nTw}+C y $D_{nT,A}$ (58,8 y 62,1, respectivamente) son superiores que las de rango ampliado (55,13 y 60,7, respectivamente). Este hecho subraya la importancia de la incorporación del procedimiento de medida a bajas frecuencias de la norma UNE EN ISO 16263-1. Las diferencias constructivas entre las estancias (Tabla 1) influyen, como era lo esperado, en el nivel de aislamiento tal y como otros autores han señalado [16]. Estas diferencias dependen, además del tipo de cerramientos, de la ejecución de todos y cada uno de los elementos constructivos de los que forman parte los recintos del ensayo y sus colindantes [paredes, suelo, techo, encuentros, regolas, puertas, ventanas...). Además, las condiciones de contorno del ensayo realizado pueden introducir otras pequeñas diferencias. No obstante, en la comparativa de resultados analizado con las diferencias entre normas, no se introduce este error.

Existen diferencias en los resultados obtenidos entre los índices $D_{nT,A}$ y D_{nTw}+C según los métodos de medida del aislamiento acústico a ruido aéreo definidos por la nueva norma UNE EN ISO 16283-1:2015, y por la antigua norma UNE EN ISO 140-4:1999 (Fig. 5). Se observan diferencias en el uso de los diferentes índices, Existen diferencias significativas ($p<0,01$, para la prueba no paramétrica con rangos de Wilcoxon) entre $D_{nT,A}$ y D_{nTW} cuando se usa el rango de 100-5000 Hz pero estas diferencias no son significativas ($p=0,21$, para la prueba no paramétrica con rangos de Wilcoxon) cuando se usa el rango de 50-5000z. Estas diferencias tienen su origen en la metodología de medida. En el índice D_{nTw}+C, obtenido por el método de la curva desplazada, se obtiene un valor ponderado "w" y corregido con la adaptación espectral "C" mientras que el índice $D_{nT,A}$ es obtenido por la aplicación directa de una curva de ponderación "A". En definitiva, se sustituye el proceso de cálculo por la comparativa con una curva de referencia, manteniendo sólo el procedimiento de cálculo mediante una suma energética ponderada de acuerdo con un espectro de referencia.

Este cambio procedimental, conlleva el relevo en el uso de descriptores normalizados (norma antigua) con el de descriptores estandarizados (curvas de ponderación en frecuencia), los cuales permiten obtener una medición que tiene en cuenta la percepción humana del aislamiento acústico (ponderación A). Esto ya fue recogido por el DB-HR con la utilización del índice $D_{nT,A}$, aunque sin incluir en el análisis los umbrales de bajas frecuencias. Nótese además, que los valores de D_{nTw}+C han de ser redondeados a un número entero, tal y como aparece en la norma ISO 717-1, mientras que los correspondientes a $D_{nT,A}$ no se les exige este redondeo tal y como aparece en el Decreto 6/2012 [1].

El principal cambio concerniente a las medidas de campo del aislamiento acústico a ruido aéreo en la nueva norma UNE EN ISO 16283-1 por debajo de los 100 Hz, para recintos con volúmenes inferiores a 25 m3, ha sido el uso de medidas en esquina para determinar la media espacial del nivel de presión sonora, y medidas en la banda de octava de 63 Hz para la medida del tiempo de reverberación. Al ampliar el rango de medida los resultados globales de aislamiento acústico son muy similares respecto a los resultados obtenidos en el rango entre 100-5000 Hz, tal y como son exigibles actualmente en el DB-HR y en el Real Decreto 6/2012 [1].

En lo relativo a los índices D_{nTw}+C (Fig. 5), se observa que en el 50% de los ensayos realizados arrojan el mismo resultado al ampliar el rango de frecuencias. En el 37 % de los casos la diferencia es positiva, es decir la utilización del índice ampliado a bajas

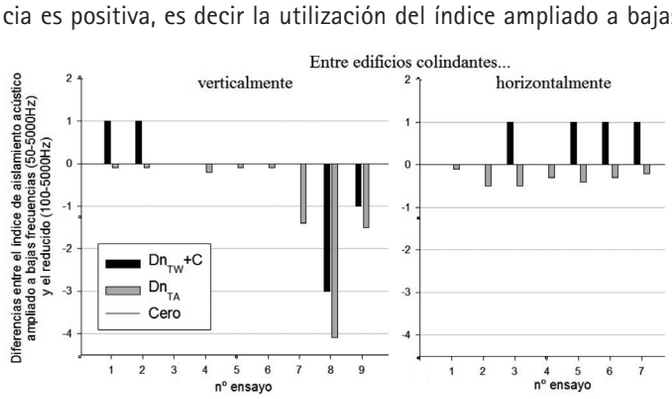


Fig. 5: Diferencias entre los índices de aislamiento acústico ampliados a baja frecuencias, utilizando el espectro ampliado de la norma UNE EN ISO 717 y reducidos contemplados en las diferentes normas UNE EN ISO 140-4 y UNE EN ISO 16283-1

Nº ensayo	Entre recintos colindantes	D_{nTw}+C (100-5000)	D_{nTw}+C (50-5000)	D_{nTA} (100-5000)	D_{nTA} (50-5000)
1v	Verticalmente	69	70	69,9	69,8
2v	Verticalmente	72	73	72,8	72,7
3v	Verticalmente	72	72	72,1	72,1
4v	Verticalmente	71	71	71,1	70,9
5v	Verticalmente	71	71	71,2	71,1
6v	Verticalmente	71	71	71,2	71,1
7v	Verticalmente	61	61	62,1	60,7
8v	Verticalmente	68	65	69	64,9
9v	Verticalmente	66	65	66,6	65,1
1h	Horizontalmente	29	29	29,4	29,3
2h	Horizontalmente	34	34	34,6	34,1
3h	Horizontalmente	44	45	45	44,5
4h	Horizontalmente	43	43	43,6	43,3
5h	Horizontalmente	38	39	39,2	38,8
6h	Horizontalmente	38	39	38,9	38,6
7h	Horizontalmente	43	44	43,7	43,5

Tabla 3: Valores globales en unidades dBA de los índices de aislamiento acústico medidos

frecuencias, implica un aumento del valor del aislamiento acústico a ruido aéreo, si bien este aumento e sólo 1 dBA. Únicamente en dos de los ensayos la diferencia es negativa, siendo en uno de ellos pequeña, de 1, y en el otro más grande de 3, lo cual puede ser atribuido a que la solución constructiva empleado o bien su ejecución, tenga un comportamiento diferente al resto de los casos, ya que sólo se observa en las estancias del edificio docente. En general, no existen diferencias significativas en este índice entre los diferentes rangos de frecuencias (p=0,06, para la prueba no paramétrica con rangos de Wilcoxon).

Si se analizan las diferencias obtenidas entre los índices $D_{nT,A}$ según su ampliación a bajas frecuencias (50-5000 Hz) se puede observar que solamente en uno de los ensayos es nula, es decir coinciden ambos índices. En todos los demás, la diferencia es negativa, es decir la utilización del nuevo índice implica una pérdida del valor del aislamiento acústico a ruido aéreo, si bien en el 75 % de los casos esta pérdida es menor a 1 dBA, por lo tanto, despreciable. Únicamente en uno de los ensayos se obtuvo una pérdida considerable de 4,1 dBA, por el mismo motivo comentado anteriormente. En general, existen diferencias significativas en este índice entre los diferentes rangos de frecuencias (p<0,01, para la prueba no paramétrica con rangos de Wilcoxon).

Las rectificaciones de normativa, orientadas a la utilización de nuevo de la derogada norma UNE EN ISO 140-4 subsanan el problema de usar la norma UNE EN ISO 16283-1:2015 como procedimiento de medida, ya que estaba limitada su utilización para las bandas de frecuencia comprendidas entre los 100 Hz y 5 kHz, por lo que desde un punto de vista práctico suponía continuar con la metodología de medida anterior. Además, estos cambios de medidas hacia bajas frecuencias vienen impulsado por la queja sistemática de los ciudadanos de percibir ruido de baja frecuencia en sus viviendas [17]. Por tanto, al incorporar en la evaluación del aislamiento acústico estas bajas frecuencias, se atienden estas demandas a la par que se mejora la fiabilidad.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado y discutido las diferencias de los valores de los índices globales de aislamiento acústico a ruido aéreo obtenidos mediante medidas "in situ" con las normas UNE-EN ISO 140-4 (derogada) y UNE-EN ISO 16283-1 (nueva) en edificios públicos resultando ser reducidas. Existen diferencias significativas al usar rango de frecuencias ampliado o no con el uso del descriptor $D_{nT,A}$ aunque carecen de significación en el descriptor D_{nTw}+C. La aplicación de los nuevos criterios no debe suponer un perjuicio para los agentes implicados (técnicos de laboratorios, fabricantes de materiales, arquitectos, técnicos de la administración, etc.). La normativa persigue incorporar la evolución de la técnica y, en este caso, la UNE-EN ISO 16283-1 incorpora aspectos, algunos más exigentes y otros no considerados anteriormente, que redundan en la mejora de la calidad de las medidas realizadas, y que, lógicamente, supondrán la necesidad de formación práctica para su realización.

Hay que indicar que en la edificación privada sería necesario revisar con cautela la comparativa entre sistemas de medida por la gran diversidad entre calidades y procedimientos constructivos. Es aquí, donde quizás se requiera un esfuerzo mayor al sector de la acústica, ya que, los técnicos y los laboratorios tendrán que adaptarse a los nuevos procedimientos y el sector de la construcción tendrá la dificultad añadida de disponer limitados valores del aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos constructivos en bajas frecuencias. No obstante, la rectificación que el Ministerio de Fomento publicó, en junio de 2016, del documento actualizado de comentarios al CTE, indica que las medidas se realizarán con la anulada UNE EN ISO 140-4, lo cual hace pensar que la decisión, por parte de las administraciones, de adoptar la nueva norma será a largo plazo.

REFERENCIAS

[1] Real Decreto 6/2012, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, núm. 24, de 6 de febrero 2012. https://www.juntadeandalucia.es/boja/2012/24/4.html (Consultado 12/08/2018)
[2] Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico "DB-HR Protección Frente el Ruido" del Código Técnico de la Edificación. Boletín Oficial del Estado, núm. 254, de 23 octubre 2007. https://www.boe.es/boe/dias/2007/10/23/pdfs/A42992-43045.pdf (Consultado 12/08/2018)
[3] Documento Básico con Comentarios DB-HR. Protección frente al ruido (Dcc-DB-HR). Abril 2016. 256 https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/proteccionRuido/historico/DccHR_201604.pdf (Consultado 20/08/2018)
[4] Documento de Apoyo al DB-HR Protección frente al ruido (DA DB-HR/ 1): "Guía de uso de las magnitudes de aislamiento acústico en relación con las exigencias". Abril 2016. https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/proteccionRuido/historico/DA-DB-HR-1_201604.pdf (Consultado 20/08/2018)
[5] Documento Básico con Comentarios DB-HR. Protección frente al ruido (Dcc-DB-HR). Junio 2016. 261 https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/proteccionRuido/historico/DccHR_201606.pdf (Consultado 20/08/2018)
[6] Documento de Apoyo al DB-HR Protección frente al ruido (DA DB-HR/ 1): "Guía de uso de las magnitudes de aislamiento acústico en relación con las exigencias". Junio 2016. (Consultado 20/08/2018)
[7] Hopkins, C. Revision of international standards on field measurements of airborne, impact and facade sound insulation to form the ISO 16283 series. Building and Environment. 2015. Vol. 92. p. 703-712. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.043
[8] AENOR-CEN. UNE EN ISO 140-4. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición in situ del aislamiento al ruido aéreo entre locales. 1999. Asociación Española de Normalización (AENOR).
[9] AENOR-CEN . UNE EN ISO 717-1. Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. 2013. Asociación Española de Normalización (AENOR).
[10] CD 16717-1 Proposal Acoustics -Evaluation of Sound Insulation Spectra by Single-Numbers -Part 1: Airborne Sound Insulation. International Organization for Standardization TC 43 / SC; 2013.
[11] Rasmussen, B., y Rindel, J.H. "Sound insulation between dwellings. Descriptors applied in building regulations in Europe". 2010. Applied Acoustics. Vol. 71(3). p. 171-180. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.05.002
[12] Rasmussen, B. "Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe". Applied Acoustics. 2010. Vol. 71(4). p. 373-385. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.08.011
[13] Rasmussen, B. "Sound insulation between Dwellings – Overview of the Variety of Descriptors and Requirements in Europe". June 2011. Proceedings of Forum Acusticum. Denmark .
[14] AENOR-CEN (2015). UNE EN ISO 16283-1. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. Asociación Española de Normalización (AENOR).
[15] Hopkins, C., y Turner, P. "Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies". Applied Acoustics. 2005. Vol. 66(12). p. 1339-1382. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.04.005
[16] Rodrigues Monteiro C., Mondaca C., Machimbarrena M., Smith S. "Revisión de la ISO 717-1. Análisis comparativo de medidas de aislamiento a ruido aéreo en paredes ligeras y pesadas utilizando diferentes descriptores de aislamiento acústico". October 2012. VIII Congreso Ibero-americano de Acústica, Évora, Portugal.
[17] Lang, J., y) Muellner, H. The importance of music as sound source in residential buildings. Internoise September 2013. Innsbruck, Austria.

Modelo de ensamble de múltiples redes neuronales artificiales para el monitoreo estadístico de patrones en procesos bivariantes



An ensemble model for statistical monitoring of patterns in bivariate processes based on multiple artificial neuronal networks

Aideé Hernández-López[1], José-Antonio Vázquez-López[2], Ismael López-Juárez[3], Roberto Baeza-Serrato[4] y José-Amir González-Calderón[5]

[1] PICyT-CIATEC). Omega no. 201 Col. Industrial Delta - 37545 León, Guanajuato (México).
[2] Tecnológico Nacional de México en Celaya. Dpto. de Ingeniería Industrial. Antonio García Cubas, 600 - 38010 Fovissste, Celaya, Guanajuato (México).
[3] Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN. Dpto. de Robótica y Manufactura Avanzada. Zona Industrial - 25900 Ramos Arizpe, Coahuila (México).
[4] Universidad de Guanajuato. Departamento de Estudios Multidisciplinarios. Av. Universidad, s/n – 38940 Colonia Yacatitas, Yuriria, Guanajuato (México).
[5] Universidad Autónoma de San Luis Potosí (IF-UASLP). CONACYT Instituto de Física. Alvaro Obregón, 64 - 78000 San Luis Potosí (México).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9222 | Recibido: 23/04/2019 • Inicio Evaluación: 25/04/2019 • Aceptado: 02/09/2019

ABSTRACT

• Multivariate control graphics detect signals out of control of the process. These signals are special patterns of joint variation, but they do not allow to determine what types of variation patterns take place in the individual variables. The referred problem has been treated through models of pattern recognition (PR) by Artificial Neural Networks (ANN). There are important advances in solving the problem to univariate cases, but not so in multivariate cases. There is no research which affirms that a single ANN can identify a multivariate out-of-control signal and recognize the special variation types of the variables individually. This research presents a model of PR of special variation in bivariate processes, and is based on an organized assembly of different types of ANN which are activated sequentially. With this work, it is possible to obtain a diagnosis of the bivariate process control that simultaneously recognizes the type of variation of the variables involved. This novel model provides the basis of new knowledge about statistical control of bivariate processes by PR through ANN. The model had two stages of training: experimental and industrial. The first one worked with data generated by Montecarlo simulation and the second one with data from a process that performs manufactured operations on metal bars used in the speed system in automobiles.

• **Keywords:** Statistical quality control, Pattern recognition, Artificial neural networks, Perceptron, Backpropagation.

RESUMEN

Los gráficos de control multivariante detectan señales fuera de control del proceso. Estas señales son en si patrones especiales de variación conjunta, pero no permiten determinar que tipos de patrones de variación ocurren en las variables individuales. El problema referido ha sido tratado mediante modelos de reconocimiento de patrones (RP) por Redes Neuronales Artificiales (RNA). Existen avances importantes en la solución del problema en casos univariantes, pero no así en casos multivariantes. No hay alguna investigación que afirme que una sola RNA puede identificar una señal fuera de control multivariante y reconocer los tipos de variación especial de las variables individualmente. Esta investigación presenta un modelo de RP de variación especial en procesos bivariantes, y se sustenta en un ensamble organizado de distintos tipos de RNA que se activan secuencialmente. Con este trabajo se pueden obtener diagnósticos del control del proceso bivariante que reconozca simultáneamente el tipo de variación de las variables involucradas. Este modelo es novedoso y proporciona las bases del nuevo conocimiento sobre control estadístico de procesos bivariantes por RP a través de RNA. El modelo tuvo dos etapas de entrenamiento: la experimental y la industrial. La primera con datos generados por simulación de Montecarlo y la segunda con datos de un proceso de manufactura que realiza operaciones de maquinado en barras metálicas usadas en el sistema de transmisión de velocidad en los automóviles.

Palabras clave: Control estadístico de la calidad, Reconocimiento de patrones, Redes neuronales artificiales, Perceptron, Backpropagation.

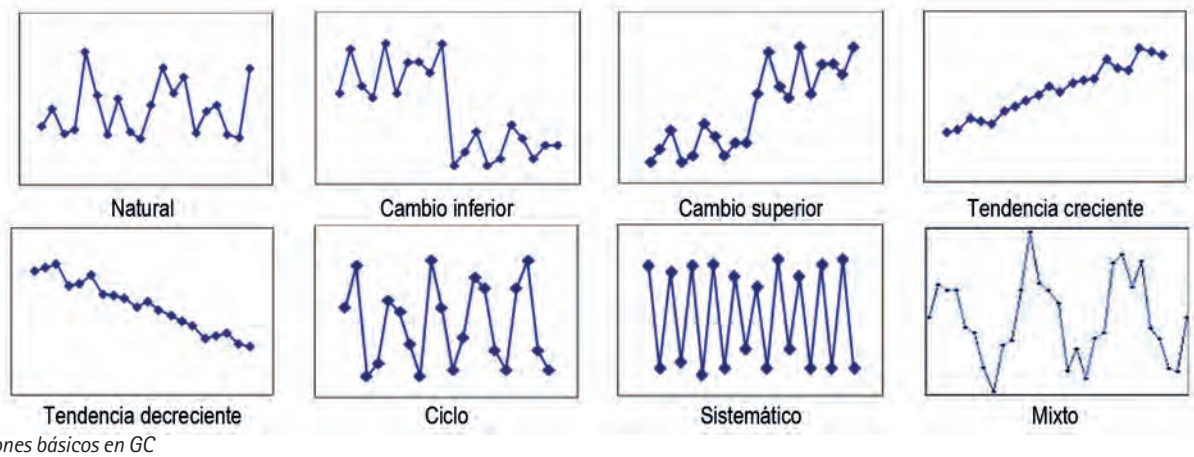


Fig. 1: Patrones básicos en GC

1. INTRODUCCIÓN

Los gráficos de control (GC) usados para mejorar la calidad de la producción se presentan en dos tipos de casos: univariantes y multivariantes. Estos gráficos son aplicados con el objetivo de identificar los dos estados de control estadístico de la calidad de los procesos, que son "estado estable" y "estado no estable"[1]. El primer estado se relaciona con la variación natural (VN) de un conjunto de datos y el segundo con la variación especial (VE). Si la variación total (VT) de los datos se puede expresar como VN + VE y en la VT se reconoce que existen patrones identificables, entonces habrá dos grandes grupos de patrones, los naturales (si VE no es significativa) y los especiales (si VE es significativa) [2-3]. Los GC tienen la tarea de mostrar visualmente el patrón de los datos (ver Fig. 1) para determinar los estados de control mencionados [4-7] siendo éstos, para estado estable, el patrón Natural (N) y para el estado no estable: Cambio inferior (CI), Cambio superior (CS), Tendencia creciente (TC), Tendencia decreciente (TD), Ciclo (C) Sistemático (S) y Mixto (M) [4-6, 8]. El tema principal de este artículo es el de reconocimiento de patrones (RP) tanto natural como especiales.

1.1 TRABAJO RELACIONADO Y CONTRIBUCIÓN ORIGINAL

Los productos fabricados suelen tener más de una característica de calidad importante y para las cuales se aplica monitoreo estadístico a través de GC. Si interesa el RP en situaciones de dos o más variables, entonces se define un proceso de monitoreo multivariante y de forma especial, si dicho interés recae en sólo dos variables, se tiene el caso bivariante. Los GC tradicionales bivariantes no son efectivos para el RP y menos cuando las características de calidad vistas como variables aleatorias están interrelacionadas entre sí. Con ello se identifica y hace necesario el RP por medios avanzados. El estudio del RP bivariante llama la atención de los investigadores ya que los avances en este tema no son suficientes, por lo que es un área de investigación abierta [6, 7-11].

Un enfoque tradicional de monitoreo bivariado (multivariante) no permite el RP sobre los patrones de la Fig. (1) en las dos variables. Entre los GC convencionales se tienen al T^2 de Hotelling (o el χ^2 cuando se conoce la matriz de covarianza del proceso) [12], el de sumas acumuladas (CUSUM) [13] y el multivariante de medias móviles exponencialmente ponderadas (MEWMA) [14]. Estos GC pueden capturar efectivamente las señales de pérdida de control en los procesos, pero ninguno puede proveer información acerca de las variables causantes de esto, como tampoco realizan el RP en los datos y variables. Esa información no identificada es de gran importancia para la solución de los problemas que intentan resolver los GC en los procesos [15]. La tendencia actual para el RP en casos univariantes y bivariantes consiste en el uso de redes neuronales artificiales (RNA) y diversos autores han publicado al respecto, como puede verse en [4-5, 9-11, 16-26]. Ninguna de estas investigaciones atiende el problema de RP para todos los patrones de la Fig. (1) y tampoco muestran si una única RNA es capaz de resolver el problema, por lo que se observa que el problema de RP bivariante es un caso complejo que demanda más allá del uso de una RNA conocida.

Otros enfoques basados también en RNA han sido investigados intensamente y algunos están basados en técnicas de aprendizaje automático [27]. Se observa que presentan en el uso práctico algunas limitaciones, pues su objetivo es minimizar el riesgo empírico de reconocer patrones erróneamente por lo que son necesarias grandes cantidades de datos para el entrenamiento. También se advierte sobre el riesgo de sobreajuste en el entrenamiento de la RNA y una pobre generalización [27]. En [28] se presenta un método de aprendizaje profundo para identificar patrones en procesos multivariantes de manufactura; este método muestra la capacidad de reconocer varios patrones en procesos multivariantes. El aprendizaje profundo es actualmente una de las herramientas de la inteligencia artificial utilizada en el control estadístico multivariante de procesos.

Otro enfoque de atención al problema planteado se puede ver en [1] donde los autores muestran un método basado en la reducción de dos dimensiones, una por cada variable del caso bivariante, a una dimensión, para hacer menos complejo el problema. Buscan demostrar que las dos variables pueden trasferir sus "propiedades de forma" de los patrones a una posición única dentro de una dimensión, esto es, que a cada combinación de dos patrones corresponde un punto en una escala. Este enfoque resulta comparable con el uso de componentes principales, en cierto modo, pero la base de razonamiento es diferente. En la presente investigación no se recurre a la reducción dimensional para atender el problema. Por otra parte, en [6] los autores realizan un análisis comparativo de técnicas clásicas de monitoreo multivariente, que son T^2 de Hotelling y MEWMA con dos tipos de RNA (perceptrón y backpropagation). Aquí conluyen que éstas RNA son eficientes para el RP por lo que ambas fueron la base para la construcción del modelo desarrollado en esta investigación.

Con la revisión de la literatura se conluye que el problema en atención de los GC bivariantes radica en cómo identificar a la variable o grupo de variables causantes de un patrón multivariante asociable a una señal de "estado no estable" en el proceso. Esto se confirma en [8] quien comenta que para un proceso multivariante, esto no ha sido definido aún. En consecuencia se ha desarrollado la propuesta mostrada en este artículo que tiene como propósito detectar patrones especiales en el caso bivariante que den orígen a un estado no estable del proceso y al mismo tiempo determinar que tipo de patrón especial se está presentando en ambas variables, lo que al mejor entedimiento de los autores, ello constituye el trabajo original de la investigación que se suma a las investigaciones más actuales sobre el tema.

1.2. APLICACIÓN INDUSTRIAL

Se consideró como caso de aplicación industrial al proceso de maquinado sobre barras metálicas empleadas en el sistema de la transmisión de los automóviles. Los maquinados se muestran en la Fig. (2). Para que cada barra cumpla con las especificaciones de calidad deben revisarse las siguientes características de calidad: concentricidad, longitud y profundidad de barrenado (ver Fig. 2). Estas características de calidad son identificadas mediante instrumentos de medición y registradas en una hoja de verificación. Se realizó un estudio de correlación de variables y se determinó que de las tres sólo concentricidad y profundidad de barrenado lo es-

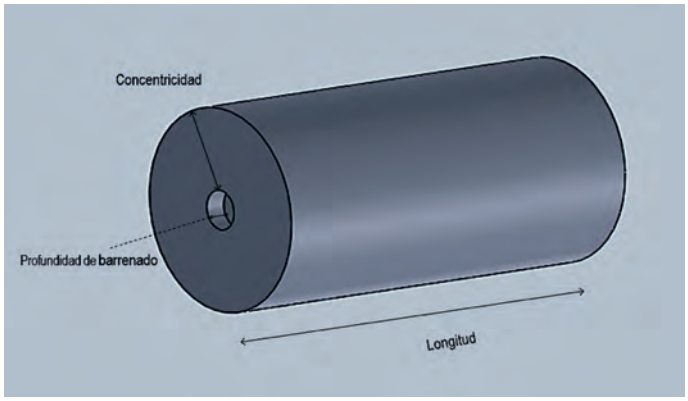


Fig. 2: Características de calidad de una barra metálica

tán de manera significativa por lo que se eligieron estas variables para el caso de aplicación industrial.

En estas dos variables se observó la presencia de solo 5 patrones de los mostrados en la Fig. (1). Los patrones detectados fueron TC, TD, CS, CI y N en las dos variables. Por tanto, el trabajo de investigación se enfocó en atender a estos patrones que fueron diagnosticados "fuera de línea" mediante técnicas estadísticas básicas. De este modo se genera la Fig. (3), que muestra 15 casos de combinaciones de los 5 patrones en las 2 variables.

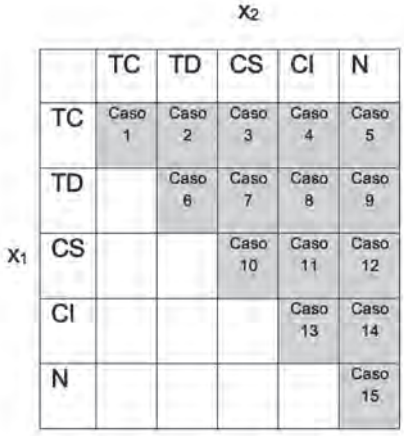


Fig. 3: Casos de patrones bivariantes de la aplicación industrial

2. MODELO DE ENSAMBLE DE MÚLTIPLES RNA (MERNA)

2.1. BASES DE DATOS PARA EL ENTRENAMIENTO DE LAS RNA

En el Modelo propuesto (Fig. 4) que contiene un ensamble de RNA se aplicó para el entrenamiento de estas redes los conceptos de base de datos inicial (BDI) y base de datos mejorada (BDM) expuestos por [5], con lo cual se logra incrementar rápidamente la eficiencia de entrenamiento. La BDI esta compuesta por 300 vectores de tamaño 12 cada uno y fueron generados por simulación de Montecarlo de acuerdo al proceso mostrado en [4-5], siendo la ecuación (1) la función generadora de datos con los patrones establecidos.

$$x_t = \mu + n_t + d_t \tag{1}$$

Donde:

μ = media global del proceso,
n_t = componente de VN como variable aleatoria con distribución normal estándar
d_t = componente de VE que es el término de alteración a estado estable del proceso

Los valores de este último componente para los patrones empleados son: N (d_t = 0.0), TC (d_t = 0.2*t), TD (d_t = -0.2*t), CSM (d_t = 2.0 en t = 6) y CIM (d_t = -2.0 en t = 6) usados todos para μ = 0 y σ = 1 sobre una base de distribución normal.

Se asume que los entrenamientos de las distintas RNA del modelo aplicados sobre la BDI genera buenos valores de entrenamiento, los cuales constituyen la mejor base de partida para los entrenamientos de las mismas RNA al agregar a la BDI los *nuevos vectores* de datos tomados del caso industrial para obtener con ello la BDM. Así se aplica un enfoque de entrenamiento de la BDM en dos etapas, la que corresponde a datos simulando patrones bien definidos y la segunda aplicada a los vectores de datos reales combinados con los patrones simulados. Para obtener la BDM se obtuvieron 250 vectores de datos reales con distintos patrones, mismos que fueron agregados a la BDI para obtener finalmente que la BDM = BDI + 250 vectores de datos reales, cuenta con 550 vectores.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL MERNA

MERNA (Fig. 4) consta de tres bloques de trabajo: Tratamiento de los datos (o pre procesamiento), Ensamble neuronal clasificador y Patrones bivariantes identificados. En el bloque 1 los vectores bivariantes son tratados estadísticamente para incrementar la eficiencia de la clasificación del modelo global. En el bloque 2 los vectores de salida del bloque 1 serán procesados por una o más RNA para obtener o bien la salida al bloque 3 o para clusterizar en familias a los patrones. El bloque 3 es donde se clasifica el tipo de patrón y en consecuencia el estado del proceso. La parte central del MERNA consta de seis RNA (llamadas clasificadores) interconectadas que actúan como una red general con entradas y salidas (ver parte central de la Fig. 4).

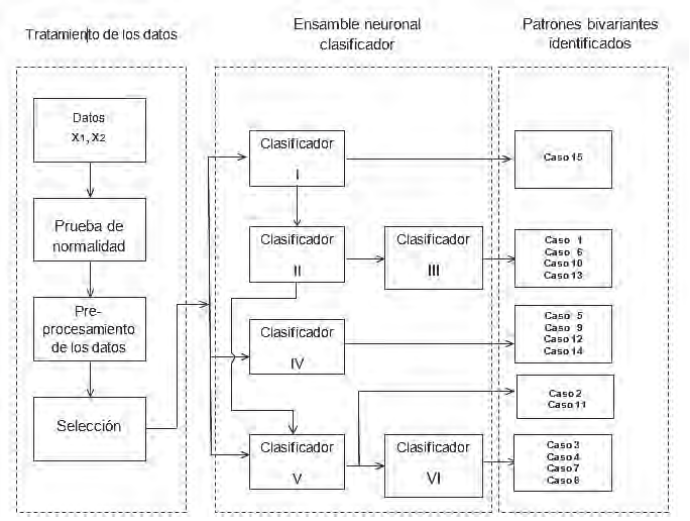


Fig. 4: MERNA para identificación de patrones bivariantes

Bloque 1. Tratamiento de datos

Sea X una variable aleatoria bivariante compuesta por X_1 y X_2 de tal modo que $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, donde $x_1 = [x_{11}, x_{21}, \ldots, x_{n1}]^T$ y $x_2 = [x_{21}, x_{22}, \ldots, x_{n2}]^T$ son las variables aleatorias univariantes que representan a dos características de calidad de un producto manufacturado.

Prueba de normalidad. Se realiza la prueba de normalidad de Kolmorov-Smirnov a los vectores de datos **X**.

Preprocesamiento de los datos. Para **X**, sea $\bar{\mathbf{X}}$ el vector de medias calculado como en la Ecuación 2 y **S** el vector de desviaciones estándar calculado conforme a la Ecuación 3.

$$\bar{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{1i} \\ \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{2i} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n-1}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{1i} - \bar{x}_1)^2} \\ \frac{1}{n-1}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{2i} - \bar{x}_2)^2} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Entonces, sea $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \end{bmatrix}$ el vector de las señales de entrada consideradas para el MERNA expuesto en la Fig. (4). El vector **A**

Característica	Clasificador*					
	I	II	III	IV	V	VI
Tipo de RNA	Per	BP	Per	Per	Per	BP
Señal de entrada	A	A	A	A	A	A
Cantidad de capas	1	3	2	2	2	3
Cantidad de neuronas por capa	[1]	[2,10,1]	[2,2]	[2,2]	[2,2]	[2,10,1]
Función de transferencia	Límite duro	Purelin Tansig	Límite duro	Límite duro	Límite duro	Purelin Tansig
Tipo de salida	[(0,1)]	[(0,1)]	[(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)]	[(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)]	[(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)]	[(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)]
Medida de desempeño para convergencia	EMA	ECM	EMA	EMA	EMA	ECM
Función de entrenamiento	Trainc MATLAB	Traingd MATLAB	Trainc MATLAB	Trainc MATLAB	Trainc MATLAB	Traingd MATLAB

*Per: Perceptron; BP: Backpropagation; EMA: Error medio absoluto; ECM: Error cuadrado medio.
Tabla 1: Características de los clasificadores por RNA

se obtiene aplicando los resultados de las Ecuaciones 2 y 3 en el arreglo mostrado en las Ecuaciones 4 y 5.

$$\mathbf{A} = f(\mathbf{N}) \tag{4}$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}\,\mathbf{X} + b_1 \\ \mathbf{S}\,\mathbf{X} + b_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Selección. Aquí se identifican los vectores **X** que presentan alguna de las combinaciones de comportamiento estadístico: normal-normal, normal-no normal o no normal-no normal. Esto permite la identificación de la ruta de entrada que seguirán los datos al bloque segundo.

a. Si **X** *es normal-normal entonces* **X** *ingresa a clasificador I.*
b. Si **X** *es normal-no normal, entonces* **X** *ingresa a clasificador IV y*
c. Si **X** *es no normal-no normal, entonces* **X** *ingresa a clasificador V.*

Bloque 2. Ensamble de RNA en MERNA

La Tabla 1 contiene la información de las topologías y otras características de las seis redes que componen al ensamble de RNA. La determinación de la cantidad de capas y neuronas por cada RNA fue hecha por procesos de ensayo y mejora, teniendo los mejores resultados conforme se muestra en la tabla.

Los tipos de salida por clasificador son combinaciones binarias que corresponden al código "testigo" de entrenamiento, siendo de la siguiente manera:

Clasificador I: (1) para el caso 15 de la Fig. (5) y (0) para cualquier otro caso.
Clasificador II: (1) para el clúster de los casos 1, 6, 10 y 13 de la Fig. (5) y (0) para cualquier otro caso.
Clasificador III: (0,0) para el caso 1; (0,1) para el caso 6; (1,0) para el caso 10 y (1,1) para el caso 13 de la Fig. (5).
Clasificador IV: (0,0) para el caso 5; (0,1) para el caso 9; (1,0) para el caso 12 y (1,1) para el caso 14 de la Fig. (5).
Clasificador V: (0,0) para el clúster de los casos 3, 4, 7 y 8; (0,1) para el caso 2 y (1,0) para el caso 11 de la Fig. (5). (1,1) cualquier otro caso, pero se determina como salida falsa.
Clasificador VI: (0,0) para el caso 3; (0,1) para el caso 4; (1,0) para el caso 7 y (1,1) para el caso 8 de la Fig. (5).

La Tabla 2 muestra los casos de combinación de patrones que cada clasificador puede reconocer de los mostrados en la Fig. (3), así como los objetivos de diseño que cada RNA como clasificador cumple dentro del MERNA. Estos objetivos son de dos tipos, clúster o clasificador final. Los clasificadores II y V clusterizan para obtener una parte del total de los casos de RP y que posteriormente en otro clasificador se identifica el caso puntual dentro de estos clústeres. La lectura de esta tabla se completa con la observación de la Fig. (5).

En la Fig. (5), se ilustran por colores los casos agrupados por los clasificadores II (en verde) y V (en azul), verde para el clúster 1,6,10 y 13 y azul para el clúster 3, 4, 7 y 8.

Bloque 3. Patrones bivariantes clasificados

Finalmente, en el último bloque se identifican los patrones bivariantes clasificados por el MERNA, para diagnosticar la estabi-

Clasificador	Objetivo del clasificador	Función en el modelo
I	Clasificador final	Identificar la combinación natural-natural (caso 15).
II	Clúster	Clúster para los casos 1, 6, 10 y 13 que corresponden a la diagonal de la Fig. (3).
III	Clasificador final	Identificar el caso específico del clúster obtenido por el clasificador II.
IV	Clasificador final	Identificar los casos 5, 9, 12 y 14
V	Clúster y clasificador final	Clúster para los casos 3, 4,7 y 8. Identificar los casos 2 y 11.
VI	Clasificador final	Identificar el caso específico del clúster del clasificador V.

Tabla 2: Objetivo de los clasificadores en el MERNA

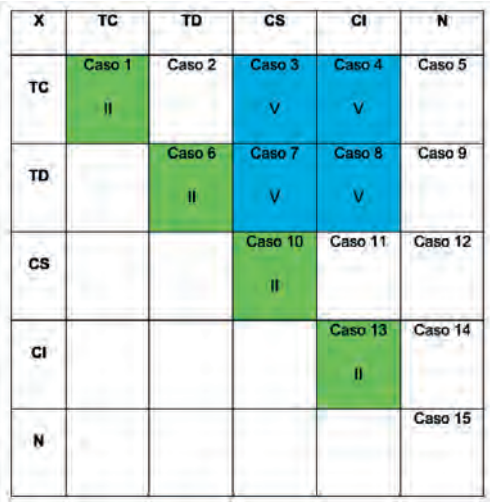


Fig. 5: Clusterización con el MERNA

lidad o inestabilidad del proceso y al mismo tiempo los patrones presentados en la variable bivariante estudiada.

3. RESULTADOS

3.1. VALIDACIÓN DEL MERNA (CASO DE ESTUDIO INDUSTRIAL)

Los datos reales considerados en esta investigación corresponden a las características de calidad concentricidad y profundidad de barrenado. Se seleccionaron estas porque en un análisis estadístico se determinó la existencia de correlación significativa entre ambas variables de las tres estudiadas. Con los datos industriales se construyó una BD de vectores bivariantes que fue estudiada por distintos métodos estadísticos y gráficos de control para determinar la combinación de patrones presentes en cada vector bivariante y tener así los vectores testigo para los entrenamientos y prueba de los clasificadores. La eficiencia del MERNA fue calculada por el porcentaje de aciertos en el RP sobre la cantidad de vectores presentes en la BDI y BDM. Un acierto es la identificación correcta de la combinación de patrones del MERNA respecto al resultado esperado tanto en la BDI como en la BDM y posteriormente, la coincidencia con la clasificación hecha por los expertos (columna 8, Tabla 3).

El proceso de validación del MERNA fue el siguiente:

a) Generación de la BDI conforme a lo indicado en la sección 2.1 para obtener los vectores $\mathbf{Y} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2]$.
b) Aplicación de las Ecuaciones 2 y 3 en Y para la obtención de los vectores de la media y desviación estándar de cada **X** en **Y**.
c) Obtención de A a partir de la Ecuación 4.
d) Entrenamiento del MERNA con la BDI y cálculo de la eficiencia en el RP de cada clasificador ver columna 1 de la Tabla 3.
e) Colecta de datos industriales de las dos variables aleatorias bajo estudio, $\mathbf{W} = [\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2]$.
f) Obtener la BDM agregando **W** a **Y** y probar con los valores de entrenamiento de las RNA obtenidos con las BDI. Dado que los tipos de patrones en **W** son conocidos se puede calcular la eficiencia del MERNA sobre la BDM y esto se muestra en la columna 2 de la Tabla 3.
g) Reentrenamiento de las RNA del MERNA hasta obtener convergencia. La eficiencia del RP se observa en las columnas 3 a 7 de la Tabla 3.
h) Probar la generalización del MERNA. Para determinar la eficiencia en el RP del modelo sobre un nuevo conjunto de vectores reales se obtuvieron 200 nuevos vectores con patrones desconocidos, provenientes del caso industrial. Se corrió el modelo con los valores de entrenamiento obtenidos en la época 5. Posteriormente, se evaluaron estos nuevos vectores "fuera de línea" y se clasificaron por expertos para comparar los resultados obtenidos por el MERNA con lo diagnosticado "fuera de línea". El porcentaje de coincidencia se muestra en la columna 8 de la Tabla 3.

4. CONCLUSIONES

Para el caso de los GC multivariantes convencionales suele solicitarse la demostración de la normalidad tanto en X_1 y X_2 como en **X** como un supuesto estadístico requerido; se señala que para el modelo mostrado en este artículo tal demostración no es solicitada, pero si es empleada a manera de la aplicación de un criterio inicial que facilita el procesamiento de la información por los clasificadores del MERNA.

No ha sido posible demostrar que una RNA por sí misma pueda reconocer patrones multivariantes como tampoco se ha encontrado información en la literatura que permita afirmarlo. Por ello, en esta investigación se concluye que un conjunto de RNA interconectadas entre sí pueden ofrecer un avance importante en la solución del problema del RP multivariantes, tal como se ha observado en investigaciones relacionadas.

Si bien una BDI con datos obtenidos por simulación de Montecarlo permite teorizar y dar buenas soluciones teóricas al problema planteado, se observó que esta base no permite generalizar a casos reales lo cual supone que en los vectores de datos reales existen condiciones de tendencia, dispersión y forma que los modelos de Montecarlo clásicos empleados en este tipo de investigaciones no pueden reproducir.

Para esta investigación se emplearon las estadísticas descriptivas de tendencia central y de dispersión como señales de entrada. Se comenta que para optar por estos estadísticos se realizaron experimentos con otro tipo de señales de entrada que no se mues-

Clasificador	BDI (1)	BDM (2)	BDM época 1 (3)	BDM época 2 (4)	BDM época 3 (5)	BDM época 4 (6)	BDM época 5 (7)	Comparación MERNA-Expertos (8)
I	100% *Sobre 50 vectores*	78% *Sobre 104 vectores*	100%	100%	100%	100%	100%	100 % *Sobre 25 nuevos vectores*
II	71% *Sobre 50 vectores*	53% *Sobre 128 vectores*	73.3%	77%	81%	84%	84.5%	82 % *Sobre 30 nuevos vectores*
III	100% *Sobre 50 vectores*	77% *Sobre 125 vectores*	100%	100%	100%	100%	100%	100 % *Sobre 30 nuevos vectores*
IV	68% *Sobre 50 vectores*	50% *Sobre 78 vectores*	75%	76%	82%	89%	89.2%	75 % *Sobre 45 nuevos vectores*
V	100% *Sobre 50 vectores*	70% *Sobre 58 vectores*	100%	100%	100%	100%	100%	100 % *Sobre 35 nuevos vectores*
VI	60% *Sobre 50 vectores*	50% *Sobre 57 vectores*	59%	68%	75%	77%	77.5%	70 % *Sobre 35 nuevos vectores*

Tabla 3: Eficiencia en el RP del MERNA

tran en el artículo, pero se afirma que tanto la tendencia central como la dispersión producen los mejores resultados del RP multivariantes. Entre otros estadísticos probados están la matriz de covarianza, coeficientes de correlación, modas y medianas.

El modelo mostrado en esta investigación debe ser acompañado con el juicio y análisis de los expertos por un periodo de prueba considerable para ser implementado totalmente en línea, debiendo los expertos tener conocimiento en inteligencia artificial para obtener BDM adecuadas a los procesos industriales de aplicación. Al parecer lo afirmado por [29] sobre el problema de búsqueda de estructuras en BD para el RP está vigente. Bezdek expresó que son necesarias tres técnicas para atender este problema: experiencia en el proceso con examinación visual, técnicas estadísticas e inteligencia artificial. Si bien, estas tres pueden emplearse unas sin las otras, para esta investigación es claro que el uso simultáneo de las tres ofrece la mejor garantía de avanzar adecuadamente en el problema de RP.

El MERNA presentado en este artículo está probado para la identificación de patrones bivariantes conformados por la combinación de los 5 patrones encontrados en el caso industrial. Un enfoque altamente interesante de ampliación de posibilidades de este método resulta en la generalización de $n = 2$ a $n > 2$, con lo cual los autores reflexionan comentando los aspectos a considerar en esta tarea. Primero, se debe entender que el crecimiento exponencial de casos combinatorios hará más grande al espacio muestral y a la población de estudio, esto es, la Fig. (3) tendrá por ejemplo para $n = 3$, la forma de un cubo y los cuadros de las combinaciones ahora tendrían profundidad para incluir a la tercera variable; esto significa que los casos multivariantes se incrementarán de manera acelerada conforme n crece. Otro aspecto importante será que los tamaños de los vectores de medias y desviaciones estándar y, por ende, las señales de entrada al MERNA también crecerá al mismo tamaño de n, pero ello no modificará a la longitud del vector de salida pues estaría siempre indicado casos de combinaciones de patrones, aunque si, como se dijo, la cantidad de los puntos muestrales y poblacionales de estudio.

Finalmente, y sin duda el concepto más relevante a analizar en la ampliación a más de dos variables en el MERNA, es "la paradoja de la dimensionalidad" o efecto Hughes [30] donde se establece que la dimensionalidad creciente disminuye la fiabilidad de las estimaciones de los parámetros estadísticos. Este efecto se puede observar en diversos campos de estudio de las ciencias como la estadística, matemáticas y por supuesto el aprendizaje inteligente. Entonces, no se podrá omitir este efecto y un escenario esperado es el decremento en la eficiencia del MERNA al menos en etapas primarias de entrenamiento. La manera de abordar este efecto conlleva a razonar en mejorar la calidad de las BDI y BDM y para valores grandes de n tal vez, emplear distintos algoritmos de entrenamiento como topologías de RNA.

REFERENCIAS

1. Hernandez-Lopez A, Vazquez-Lopez JA, Lopez-Juarez I, Lefranc G (2015) Pattern recognition in multivariate statistical process control for dimensional transformation of statistical parameters. In: 2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). IEEE, pp 19–24
2. Levy Mangin J-P, Vargas Vargas M, Alfaro Navarro JL, Mondejar Jimenez J (2010) Graficos multivariantes aplicados al control estadístico de la calidad. Netbiblo
3. Bartes A, Llabres XTM (2004) Métodos estadísticos. Control y Mejora de la Calidad. Barcelona: Alfaomega, Catalunya
4. Guh R-S (2005) Real-time pattern recognition in statistical process control: A hybrid neural network/decision tree-based approach. Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf 219:283–298. doi: https://doi.org/10.1243/095440505X28963.
5. Vazquez-Lopez J.A., Lopez-Juarez I. (2009) SPC without Control Limits and Normality Assumption: A New Method. In: Bayro-Corrochano E., Eklundh JO. (eds) Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. CIARP 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5856. Springer, Berlin, Heidelberg.
6. Pamela C-S, Ismael L-J, José Antonio V-L (2014) Reconocimiento de variables multivariantes empleando el estadístico T2 Hotelling y MEWMA mediante las RNA's. Ing Investig y Tecnol 15:125–138. doi: https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)30011-1
7. Ruelas Santoyo E A, et al (2017) Sistema para el Monitoreo y Control de Procesos Multivariantes a través del Estadístico T2 de Hotelling y la Red Neuronal Artificial Fuzzy ARTMAP. Dyna Manag 5:[12 p.]-[12 p.]. doi: https://doi.org/10.6036/MN8206
8. Hachicha W, Ghorbel A (2012) A survey of control-chart pattern-recognition literature (1991–2010) based on a new conceptual classification scheme. Comput Ind Eng 63:204–222. doi: https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.03.002
9. Masood I, Hassan A (2014) Expert Systems with Applications Bivariate quality control using two-stage intelligent monitoring scheme. Expert Syst Appl. doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.042
10. Yu J, Xi L (2007) A Neural Network Ensemble for Classifying Source(s) in Multivariate Manufacturing Processes. 1246–1250
11. Bersimis S (2017) Methods for interpreting the out-of-control signal of multivariate control charts: A comparison study. 2295–2326. doi: https://doi.org/10.1002/qre.2191
12. Hotteling H (1947) Multivariate quality control ilustrated by the air testing of sample bombsights. In: Eisenhart M, Hastay W, Wallis W (eds) Techniques of statistical analysis. Mc Graw Hill, New York, pp 11–184
13. Lowry CA, Woodall WH, Champ CW, Rigdon SE (1992) A Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart. Technometrics 34:46. doi: https://doi.org/10.2307/1269551
14. Crosier RB (1988) Multivariate Generalizations of Cumulative Sum Quality-Control Schemes. Technometrics 30:291–303. doi: https://doi.org/10.1080/00401706.1988.10488402
15. Masood I, Hassan A (2010) Issues in development of artificial neural network-based control chart pattern recognition schemes. Eur J Sci Res 39:336–355
16. Zorriassatine F, Tannock JDT (1998) A review of neural networks for statistical process control. J Intell Manuf 9:209–224
17. Zorriassatine F, Al-Habaibeh A, Parkin RM, et al (2005) Novelty detection for practical pattern recognition in condition monitoring of multivariate processes: a case study. Int J Adv Manuf Technol 25:954–963. doi: https://doi.org/10.1007/s00170-004-2174-8
18. Yu J, Xi L (2009) A neural network ensemble-based model for on-line monitoring and diagnosis of out-of-control signals in multivariate manufacturing processes. Expert Syst Appl 36:909–921. doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.10.003
19. Yu J, Xi L, Zhou X (2009) Identifying source(s) of out-of-control signals in multivariate manufacturing processes using selective neural network ensemble. Eng Appl Artif Intell 22:141–152. doi: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2008.05.009
20. Hwarng H (1992) Pattern recognition on Shewhart control chart using a Neural Network approach. Arizona State Univ.
21. Cheng C-S (1997) A neural network approach for the analysis of control chart patterns. Int J Prod Res 35:667–697. doi: https://doi.org/10.1080/002075497195650
22. Pugh GA (1989) Synthetic neural networks for process control. Comput Ind Eng 17:24–26. doi: https://doi.org/10.1016/0360-8352(89)90030-2
23. Pham DT, Liu X (1995) Neural Networks for Identification, Prediction and Control. Springer London, London
24. Pacella M, Semeraro Q, Anglani A (2004) Manufacturing quality control by means of a Fuzzy ART network trained on natural process data. Eng Appl Artif Intell 17:83–96. doi: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2003.11.005
25. El-Midany TT, El-Baz MA, Abd-Elwahed MS (2010) A proposed framework for control chart pattern recognition in multivariate process using artificial neural networks. Expert Syst Appl 37:1035–1042. doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.05.092
26. Zobel * CW, Cook DF, Nottingham QJ (2004) An augmented neural network classification approach to detecting mean shifts in correlated manufacturing process parameters. Int J Prod Res 42:741–758. doi: https://doi.org/10.1080/00207540310001602856
27. - ZB, - LF, - LS (2012) A Hybrid Svm Model for On-Line Monitoring And Diagnosing Mean Shifts In Multivariate Processes. J Converg Inf Technol 7:102–114. doi: https://doi.org/10.4156/jcit.vol7.issue23.13
28. Yu J, Zheng X, Wang S (2019) Stacked denoising autoencoder - based feature learning for out - of - control source recognition in multivariate manufacturing process. 204–223. doi: https://doi.org/10.1002/qre.2392
29. Bezdek JC (1981) Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Springer US, Boston, MA
30. Hughes GF (1968) On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. IEEE Trans Inf Theory 14:55–63.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT), el apoyo recibido en la formación doctoral de la M.C. Aideé Hernández López.

Eficacia de anclajes para refuerzos estructurales con materiales compuestos de matriz polimérica y cementosa



Efectiveness of anchors for structural retrofitting with composite materials of polymeric and cementitious matrices

Paula Villanueva-Llauradó, Adriana Cortez-Flores y Jaime Fernández-Gómez
Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Civil. Calle Profesor Aranguren, 3 – 28040 Madrid (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8269 | Recibido: 27/01/2019 • Inicio Evaluación: 17/05/2019 • Aceptado: 17/10/2019

ABSTRACT

- Structural retrofitting of RC and masonry members with composite materials has achieved great popularity in recent years. Among these systems, a distinction can be made between composite materials with polymeric (FRP) and cementitious (FRCM) matrices; the former are more broadly employed, although the latter are generally acknowledged in the field of historic constructions, especially in brick masonry. Premature debonding has been pointed out as a critical failure mode in FRP systems, leading to the development of a range of anchorage techniques to delay or prevent debonding. FRCM, suffers from a different problem, which is its weak interaction fibres-matrix; for that reason, anchorage techniques originally conceived for FRP have been investigated with the aim of enhancing the performance of fibres-mortar interface in FRCM reinforcements. This paper collects main research papers for FRP and FRCM systems, and discusses the role of anchors depending on the matrix of the reinforcement.
- **Keywords:** Structural retrofitting, FRP, FRCM, Anchorage techniques, failure mode.

RESUMEN

Los refuerzos de estructuras de hormigón y de fábrica con materiales compuestos con fibras han alcanzado gran popularidad en las últimas décadas dentro del ámbito del refuerzo estructural. Entre estos sistemas cabe distinguir entre refuerzos con matriz polimérica (FRP) y cementosa (FRCM), siendo estos últimos menos conocidos, aunque más comúnmente aceptados para rehabilitación de estructuras históricas. El despegue prematuro es un modo de fallo crítico en los sistemas de FRP, lo que motivó la aparición de diversos sistemas de anclaje. Por su parte, el FRCM presenta una interacción fibras-matriz más débil, por lo que diversos sistemas anteriormente limitados al anclaje de refuerzos de FRP han comenzado a investigarse como una posible solución para mejorar el comportamiento de la interfaz fibras-matriz cementosa. Este artículo recopila las principales investigaciones realizadas con anclajes en refuerzos FRP y FRCM, y analiza los modos de fallo presentes en la literatura y el tipo de contribución efectuada por los anclajes en FRP y FRCM.

Palabras clave: Refuerzo estructural, FRP, FRCM, sistemas de anclaje, modo de fallo.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha crecido el interés por prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón armado, de fábrica y de madera. La importancia de la durabilidad ha llevado a distintas estrategias para preservar las estructuras de obra civil y edificación, que pueden clasificarse en dos grandes grupos en función del tipo de intervención a realizar: reparación de estructuras dañadas, restableciendo algunas propiedades pérdidas o para preservar la integridad o funcionalidad de la estructura; y refuerzo, el cual puede precisarse para hacer frente a un nuevo estado de cargas, para adaptar la estructura a la normativa vigente o para compensar la pérdida de resistencia de algunos de sus elementos [1,2].

La necesidad de reforzar estructuras ha resultado en el desarrollo de diversas tecnologías de refuerzo. Tradicionalmente, dichas tecnologías han consistido en cosidos, recrecidos de mortero y hormigón, y diversos sistemas con elementos metálicos. En la década de 1980 surgen los primeros refuerzos con materiales compuestos con fibras de elevada resistencia (vidrio, aramida y carbono) y matriz polimérica (principalmente epoxi), materiales anteriormente limitados a aplicaciones aeroespaciales e industriales; desde un principio se señalan como principales ventajas de estos materiales: elevada resistencia y relación resistencia/peso, facilidad de aplicación, y mejor durabilidad en comparación con los refuerzos de acero [2]. Los polímeros reforzados con fibra han conseguido en las últimas tres décadas una considerable expansión como refuerzos exteriores e internos de estructuras de hormigón y, aunque en menor medida, de fábrica de ladrillo y piedra [3]. El material suplementario trata los elementos que pueden reforzarse con FRP.

Las matrices cementosas surgen como una alternativa para combatir estas desventajas de las resinas poliméricas. De esta forma, aparecieron los refuerzos de mortero reforzados con fibras (FRCM), que derivan de los hormigones con fibras, pero empleando fibras de gran longitud como en el FRP, y para usos similares (confinamientos, refuerzos a flexión y cortante, y mejora de la resistencia frente a sismo) [4]. A diferencia del FRP, que puede venir laminado de fábrica, en los refuerzos de FRCM siempre se aplica la matriz directamente en el momento de la adhesión al soporte, con laminación en húmedo de las fibras en forma de mallas o tejido. Junto con las fibras de vidrio, carbono y basalto, que actualmente se utilizan ampliamente en refuerzos de FRP, la tecnología de los refuerzos de matriz cementosa ha incorporado fibras de altas prestaciones como el polybenzoxazole (PBO), caracterizado por una muy elevada resistencia a tracción con un módulo elástico

más bajo que el de la fibra de carbono [5–7]. Como consecuencia de su mayor ductilidad, el FRCM es especialmente popular para paños de fábrica [4], y estructuras abovedadas [8,9].

Recientemente se han publicado investigaciones que comparan la eficacia de refuerzos de FRP y FRCM,[3,10]. Estas investigaciones indican que los refuerzos con FRP alcanza unos incrementos de resistencia del orden de un 40-50% superiores a los refuerzos con FRCM, principalmente como consecuencia de las diferencias en el modo de fallo observado en uno y otro sistema. Una comparativa interesante es la realizada por [10] para refuerzos a cortante, señalando que el FRCM presenta peor comportamiento en términos de carga última pero mejor en términos de ductilidad, e indicando que la eficacia de ambos sistemas está fuertemente condicionada por la configuración geométrica del refuerzo.

2. ADHERENCIA DE LOS REFUERZOS DE FRP Y FRCM AL SOPORTE

2.1. EL FENÓMENO DEL DESPEGUE DE LOS REFUERZOS DE FRP

El despegue prematuro del soporte es el modo de fallo más limitante en el diseño de refuerzos de FRP. Por ello, se han realizado numerosos estudios para la caracterización de la resistencia de adherencia en la interfaz FRP-soporte, tales como los realizados para refuerzos de hormigón por [11–14] y los que investigan la adherencia de la resina epoxi a soportes de fábrica, tales como [15–17].

De la literatura existente sobre el despegue de los refuerzos de FRP puede concluirse que la resistencia a despegue queda definida por la resistencia a tracción del soporte, la cual determina la tensión máxima de adherencia que provoca el fallo adherente (fallo cohesivo en el propio soporte, a milímetros de la superficie de adherencia). En el fenómeno del despegue también participan propiedades tales como el módulo elástico y espesor del refuerzo, y el ratio ancho del refuerzo/ancho del soporte. Todos estos aspectos suelen integrarse en los modelos de cálculo que predicen la máxima resistencia de adherencia del FRP, entre los que cabe destacar [13,18]. De igual forma, existe consenso en la comunidad científica en lo referente a la existencia de una longitud efectiva de transferencia de tensiones, más allá de la cual no se consigue mayor resistencia de adherencia entre el refuerzo y el soporte [12]. Sin embargo, proporcionar una longitud adherida mayor a la efectiva sí se ha relacionado con un incremento de la ductilidad, al concatenarse el fallo adherente en distintos puntos del refuerzo.

Las actuales guías de diseño y normativas tales como la italiana CNR-DT 200 [19], la inglesa TR55 [20] o la americana ACI 440.40 [21] establecen niveles aceptables de deformación a tracción del FRP, con objeto de impedir alcanzar la resistencia de adherencia y por tanto el fallo a despegue. Estos límites son cercanos al 10-25% de la resistencia a tracción del material compuesto, desaprovechando las propiedades mecánicas del material.

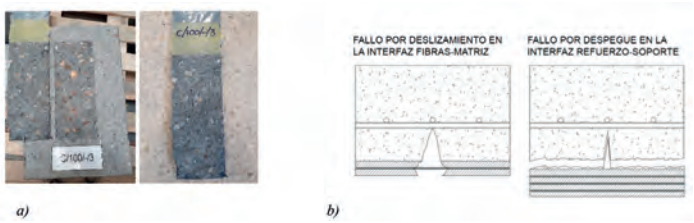


Fig. 1. Degradación de la adherencia en FRP (a) y modos de fallo frecuentes en FRCM (b)

La limitación del fallo por despegue en la eficiencia de los refuerzos de FRP ha llevado a la aparición de diversas propuestas de sistemas de anclaje en las últimas dos décadas [22,23].

2.2. MECANISMOS DE FALLO EN REFUERZOS CON FRCM

Para el FRCM, el estado del conocimiento en cuanto a sus modos de fallo es bastante más limitado, en parte por tratarse de una tecnología de más reciente incorporación a la construcción y en parte por la diversidad de composiciones de la matriz y tipos de fibras, que resulta en una mayor complejidad de comportamiento.

La respuesta de los materiales compuestos en estado de tracción o flexotracción suele caracterizarse por una primera rama elástica, en la que la matriz no está fisurada, seguida de una rama con fisuración progresiva del mortero que finaliza en rotura de las fibras o en despegue de las fibras.

El fenómeno del despegue no es análogo al producido en el FRP, ya que la superficie de fractura en refuerzos de FRP prácticamente siempre se produce en el soporte, de forma cohesiva. Por su parte, entre refuerzos de FRCM y soportes de fábrica se producen distintos mecanismos de despegue, según se recoge en [24]a total of 80 specimens were fabricated and tested under double-lap direct shear. It is mainly concluded that: (a, incluyendo deslaminación entre las fibras y la matriz (y consecuente fallo del sistema como material compuesto); el fallo de adherencia en la interfaz fibras-matriz es provocado por el deslizamiento de las fibras respecto a la matriz, manteniéndose esta última adherida al soporte, y ha sido señalado como el más frecuente en ensayos con FRCM [25]. Cabe señalar aquí la dificultad de elaborar modelos predictivos para refuerzos de matriz cementosa, por las variaciones en dosificación del mortero, tipo de fibras y tipo de configuración geométrica de las mismas en el tejido. A pesar de ello, diversos autores han propuesto estimaciones de la longitud efectiva de adherencia y resistencia de adherencia, en función de sus resultados experimentales [26,27], con elementos finitos [28].

La Figura 1 muestra los fallos típicos de adherencia en FRP (a) y en FRCM (b).

Algunos autores han destacado que el modo de fallo en FRCM depende en gran medida del número de capas de fibras del refuerzo [25,26,29,30], mejorándose la interacción con la matriz con mayor cuantía de fibras, lo que es un indicio de una posible forma de combatir el fallo prematuro por despegue de la interfaz fibras-matriz.

Para refuerzos de FRCM, la normativa de diseño es la ACI 549.4R [31], que propone una limitación análoga a la del FRP en términos de deformación unitaria máxima, pero más restrictiva por las incertidumbres propias del tipo de material y modo de fallo (0.012).

3. SISTEMAS DE ANCLAJE EN REFUERZOS DE FRP Y FRCM

Las técnicas de anclajes para FRP han sido comentadas de forma exhaustiva en [22,23]. Pueden distinguirse dos tipos de sistemas de anclaje: externos y embebidos (ver material suplementario). Los sistemas externos incluyen los anclajes tipo parche [32] y los encamisados en U, que han sido utilizados para prevenir el despegue de refuerzos inferiores principalmente en vigas de hormigón armado. Las técnicas embebidas suelen lograr un mayor incremento de la resistencia máxima, e incluyen: anclajes con pernos metálicos, llaves de cortante, anclajes con barras embebidas en el extremo del refuerzo (que queda enrollado alrededor de la propia barra), y anclajes de FRP.

La tecnología de anclajes nacida de los anclajes de FRP, aplicada a refuerzos de matriz cementosa, fue objeto de un primer

artículo [4] en el que se trataron las especificidades propias del cambio de material de matriz, empleando tejido de fibra de basalto y conservando las fibras transversales de la zona del abanico.

Merece particular atención el hecho de que, al nacer la tecnología de anclajes para refuerzos FRCM de las experiencias previas con FRP, los anclajes de fibras han sido utilizados, prácticamente de forma indistinta, con adhesivo polimérico y cementoso en el tramo embebido. Esto dificulta considerablemente la creación de un corpus de conocimiento específico de anclajes de FRP y anclajes textiles, con adhesivo cementoso.

4. FORMA DE TRABAJO DE ANCLAJES EN FRP Y FRCM

Tanto los anclajes de FRP para refuerzos de matriz polimérica como los anclajes textiles y de FRP para matriz cementosa han mostrado elevada eficacia en la mejora de la resistencia de los respectivos refuerzos. Sin embargo, la forma de trabajo y por tanto los mecanismos resistentes que movilizan los anclajes difiere notablemente en función del material de matriz.

Las contribuciones sobre anclajes de refuerzos de FRP son más numerosas, y pueden clasificarse en función de si estudian: anclajes aislados [33–35]; tejidos anclados ensayados a corte simple o doble adheridos o sin adherir; soluciones constructivas tales como vigas, losas o soportes [36–39]. Adicionalmente, algunos autores tratan la mejora alcanzada con anclajes múltiples [40,41].

De estas campañas experimentales se ha obtenido un conocimiento considerable de la respuesta de refuerzos de FRP anclados, si bien la aparición de modelos predictivos es bastante reciente. En este sentido, el primer artículo en abordar la resistencia unitaria de anclajes de FRP es el de Kim y Smith [54], el cual ha tenido una gran aceptación por parte de la comunidad científica. En los últimos tres años han aparecido los primeros modelos predictivos y de diseño para resistencia unitaria anclajes de FRP a cortante y para refuerzos de FRP anclajes [42–44].

En el caso de los refuerzos FRCM, la investigación de sistemas de anclajes ha estado centrada principalmente en soluciones constructivas completas, con diversos patrones geométricos para la distribución de anclajes, tales como las contribuciones de [1,3,8–10,30,45–47]. Esto ha dificultado el estudio independiente de la contribución de anclajes, para su comparación directa con los refuerzos de FRP. Sin embargo, sí existen contribuciones que han estudiado de forma comparativa el refuerzo de elementos estructurales con FRP y FRCM, de los que se pueden inferir algunos aspectos específicos del anclaje de refuerzos con matriz cementosa. Un ejemplo notable es [48], quienes compararon anclajes con tramo embebido adherido con epoxi y mortero, para refuerzos de FRP y FRCM; la principal conclusión es que la efectividad de los anclajes era muy superior en refuerzos de FRP, y que el uso de material cementoso para adherencia de los anclajes al soporte obtenía una eficacia 15% inferior a la de los anclajes impregnados con epoxi.

4.1. RESISTENCIA DE ANCLAJES DE FIBRAS (IMPREGNADOS CON POLÍMEROS)

A día de hoy, no existen publicaciones que refieran la resistencia unitaria de anclajes con mortero en el tramo embebido, por lo que el presente apartado se centra en los esfuerzos para caracterizar el comportamiento de los denominados anclajes de FRP.



Figura 2: Modos de fallo para anclajes de FRP

La resistencia unitaria de anclajes de fibras depende de la configuración geométrica y patrón de cargas [38], por lo que su forma de trabajo depende del ángulo de inserción. Diversos autores han reseñado la reducción de capacidad resistente cuando los anclajes tienen tramo de doblado [4,35,36].

La resistencia unitaria de los anclajes es determinada por su modo de fallo. Para anclajes trabajando a tracción (sin radio de doblado), los modos de fallo son los mismos que se han observado tradicionalmente para anclajes adherentes [49]. Cuando existe un tramo de doblado, se produce una concentración de tensiones en esa zona que puede conllevar un fallo prematuro. Los modos de fallo más comunes en refuerzos anclados con anclajes de FRP se recogen en la Figura 2.

El modelo de Kim y Smith [50] trata el fallo adherente y el fallo a tracción, desarrollando ecuaciones basadas en modelos existentes para anclajes adheridos. En este sentido, y de forma análoga a los anclajes químicos, la resistencia de adherencia dependerá del material empleado como adhesivo.

En cuanto al fallo por doblado, dos de los modelos existentes para resistencia de anclajes de FRP en refuerzos sometidos a flexión y cortante incluyen la reducción de resistencia por concentración de tensiones en el tramo de doblado [42,43]. En ambos casos se parte del conocimiento relativo a refuerzos internos de fibra de carbono y de vidrio, realizando modificaciones para tener en cuenta la falta de confinamiento del tramo del abanico y profundidad embebida, entre otros.

4.2. CONTRIBUCIÓN DE LOS ANCLAJES A LA RESISTENCIA DE REFUERZOS ANCLADOS

En anclajes de FRP, siguiendo los modos de ensayo (cortante simple y doble) más comunes en refuerzos adheridos, los autores han comparado generalmente los resultados de tejidos adheridos con tejidos adheridos y anclados, sometidos a cortante, con diversas configuraciones de anclajes. Entre los trabajos que abordan esta cuestión cabe señalar: Breña y McGuirk [51]. Puede aceptarse, de forma simplificada, que la resistencia aportada por el anclaje puede obtenerse como la resta de la carga máxima del refuerzo anclado menos la resistencia de adherencia. En el caso de anclajes múltiples, la relación es mucho más compleja al incluir variables tales como el espaciamiento y la configuración geométrica, según puede extraerse de contribuciones como [41,52,53].

En refuerzos de FRCM existe una base de datos más heterogénea y, como se ha señalado anteriormente, la mayoría de ensayos se han realizado en soluciones estructurales completas. Tetta et al. [10] observaron que en refuerzos de FRCM el modo de fallo se alteraba en función del número de capas de tejido en el refuerzo, es decir, de la cuantía de fibras; los autores atribuyeron la mejora con múltiples capas al mecanismo adherente movilizado entre ellas, que reduce la fisuración.

Tzoura y Triantafillou [54] observaron una mejora notable en encamisados en U con la inclusión de anclajes. Por su parte, Koutas et al. [4] ensayaron paños de fábrica con refuerzo de FRCM y anclajes textiles, que compararon con refuerzos sin anclar; sus resultados relacionan directamente el número de capas en las zonas críticas para la transmisión de tensiones con la eficacia del refuerzo.

Las investigaciones reseñadas señalan adecuadamente la forma de trabajo de los anclajes en este tipo de refuerzos: no solamente mejoran la transferencia de tensiones del refuerzo al soporte, como en refuerzos de FRP, sino que incrementan la cuantía de fibras en zonas determinadas mejorando el comportamiento monolítico del

material. En particular, los resultados de Tetta y Bournas [3] para refuerzos en vigas a altas temperaturas destacan que, pese al fallo de la resina adherente de los anclajes al soporte, los elementos anclados mejoraron un 80% la eficacia respecto a los simplemente adheridos, como consecuencia de la mayor cuantía de fibras en las zonas de abanico de los anclajes. Este tipo de fenómeno se ve favorecido por la inclusión de múltiples anclajes, situación común en refuerzos de FRCM. Los ensayos realizados por Marcinczak et al. [55] también apuntan a la mejora conseguida gracias a los anclajes en el modo de trabajo y retraso del fallo en la interfaz fibras-matriz, pudiéndose alcanzar mayores deformaciones unitarias, en vigas reforzadas con fibras de PBO en matriz cementosa.

Se comenta a continuación el incremento de resistencia conseguido por anclajes en FRCM y FRP, partiendo de los resultados de [4] para FRCM ya que dentro de la literatura presentan resultados específicos de aporte de anclajes en FRCM y de los propios autores para FRP [56], en los que se han empleado parámetros de la literatura para el diseño de los propios anclajes. Los ensayos cuyos resultados recoge la figura 3b corresponden a una campaña experimental llevada a cabo por los autores con ensayo de corte simple en probetas de hormigón con refuerzos anclados ubicando el anclaje en tres posiciones diferentes respecto al extremo cargado y estudiando la disposición de su tramo libre sobre el refuerzo y entre dos capas. Los resultados en términos de incremento de resistencia de probetas ancladas (Pmáx) respecto a serie de control (Pmáx C) se muestran en la figura 3. La elección de comparar estos ensayos concretamente se debe al tipo de ensayo, a la disposición de un único anclaje por tejido y a la existencia de probetas control para cada configuración en FRCM y FRP.

Desde el punto de vista cuantitativo la comparación de resultados en FRCM y FRP indica que la mejora en refuerzos anclados de una capa es similar en ambos casos, mientras que es al menos un 40% superior en FRP cuando se comparan refuerzos anclados de dos capas.

En la Figura 3a se recogen los resultados de refuerzos de una capa (izquierda) y dos capas (derecha) de FRCM con anclajes. Puede apreciarse que el aporte de resistencia de los anclajes es menos significativo con dos capas, debido a la mayor resistencia de las probetas de control con dos capas de refuerzo. El modo de fallo de las probetas control en esta campaña experimental fue por rotura de fibras es cremallera consecuente de la fisuración de la matriz y fallo de monolitismo del sistema. En el caso de los refuerzos anclados el fallo se inició por deslizamiento del abanico del anclaje seguido por fallo en el refuerzo o en el tramo de doblado del anclaje. Los resultados según puede apreciarse por el modo de fallo y por la Figura 3a), sugieren que los anclajes en FRCM están actuando como una capa adicional de refuerzo siendo por ello su aprovechamiento mayor cuanto menor es el número de capas originales, retrasando el deslizamiento fibras matriz. Sin embargo, con el diseño de esta campaña experimental no se ha conseguido evitar el deslizamiento del abanico por ser el punto más débil del refuerzo.

Con respecto a los refuerzos anclados de FRP (Figura 3b) se observa que la tendencia se invierte y el aprovechamiento es mayor para refuerzos con el abanico del anclaje instalado entre dos capas. Estos resultados se relacionan con el modo de fallo que fue frágil para refuerzos de una capa fallando la interacción refuerzo-abanico de anclaje, y dúctil para refuerzos con dos capas consiguiendo un mayor aprovechamiento de la capacidad unitaria del anclaje (por rotura de anclaje en el tramo de doblado o arrancamiento del mismo).

Es preciso mencionar que las condiciones de los ensayos arriba comentados, difieren notablemente, por lo que las observaciones deben ser tomadas con precaución. Sin embargo, si es posible extraer como conclusión que los fenómenos implicados en el comportamiento en los dos tipos de refuerzo impiden el empleo de un criterio único de diseño para anclajes en FRP y FRCM. Los mecanismos de fallo se entienden como la ilustración más clara de los elementos a optimizar para cada caso.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha realizado una descripción y análisis de las investigaciones precedentes en materia de refuerzo estructural con materiales compuestos, tanto con matriz polimérica (FRP) como con matriz cementosa (FRCM), destacando la comparativa entre la aplicación de anclajes tipo *spike anchor* a uno y otro sistema.

Los sistemas de anclaje son beneficiosos para el comportamiento general de los refuerzos con materiales compuestos, permitiendo alcanzar una mayor eficiencia del sistema con mayores resistencias máximas.

El FRCM aparece como una alternativa válida al FRP, especialmente para la rehabilitación y refuerzo de estructuras de fábrica o con una resistencia del soporte moderada o baja. El comportamiento de los refuerzos de FRCM difiere significativamente del de los refuerzos de FRP, lo que puede condicionar los mecanismos de transferencias de tensiones y eficacia de los sistemas de anclaje.

Los resultados obtenidos por los autores en FRP demuestran que la presencia de anclajes produce un incremento en la tensión de adherencia entre el 50 y el 154% dependiendo de su configuración. Por su parte, en base a los resultados de la bibliografía para FRCM esta mejora está limitada al 9-110%. La mejora en resistencia de FRCM alcanzada con ayuda de anclajes se ha relacionado, en la literatura, con la mitigación de la degradación de la adherencia fibras-matriz, que suele ser limitante en este tipo de refuerzos.

A fecha de hoy, existen escasos modelos numéricos (no incluidos en guías de diseño) para anclajes de FRP, y no se ha publicado ningún modelo equivalente en refuerzos de matriz cementosa; esto ha sido motivado, entre otros factores, porque la mayoría de investigaciones con FRCM se han realizado ensayando elementos estructurales, en lugar de probetas estandarizadas.

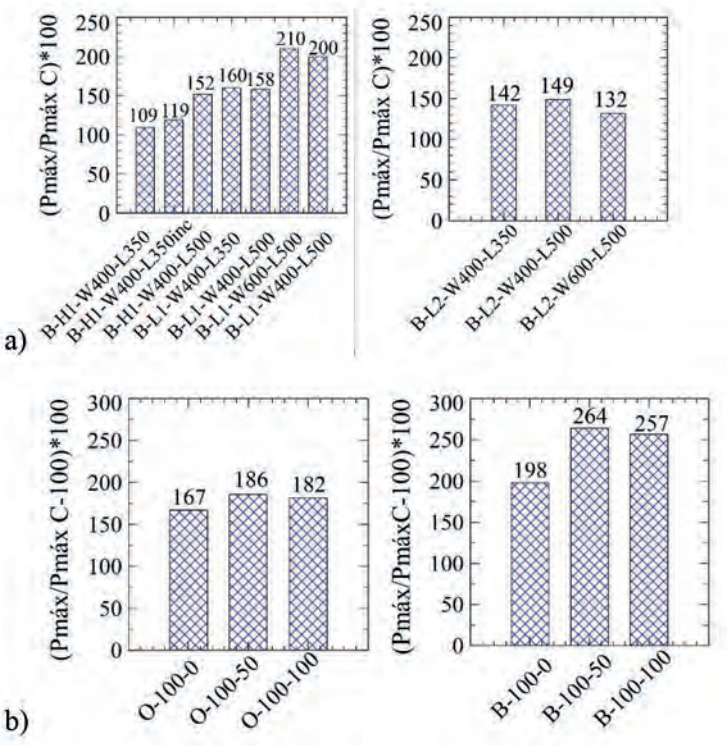


Figura 3 a) Incremento de resistencia FRCM [4] b) Incremento resistencia FRP (por los autores) {Formatting Citation}

En función de los datos disponibles, puede concluirse que los anclajes en este tipo de refuerzo funcionan más como una capa adicional de fibras que refuerza la zona crítica para la transferencia de tensiones que como un mecanismo de anclaje independiente que simplemente traslada las tensiones al soporte, como ocurre en los refuerzos de FRP. Los autores consideran crucial esta diferencia, y la observada en los modos de fallo de refuerzos anclados de FRP y FRCM, que deben focalizar futuras investigaciones para el diseño de estos sistemas.

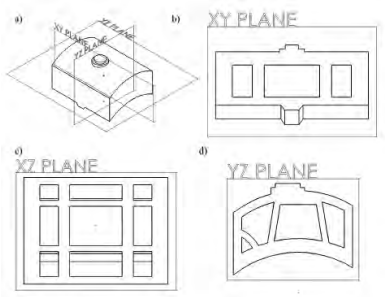
REFERENCIAS

[1] A. D'Ambrisi, F. Focacci, R. Luciano, V. Alecci, and M. De Stefano, "Carbon-FRCM materials for structural upgrade of masonry arch road bridges," Compos. Part B Eng., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.024)
[2] J. P. Firmo, J. R. Correia, and L. A. Bisby, "Fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete structural elements: A state-of-the-art review," Compos. Part B Eng., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.045)
[3] Z. C. Tetta and D. A. Bournas, "TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures," Compos. Part B Eng., 2016. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.026.)
[4] L. Koutas, A. Pitytzogia, T. C. Triantafillou, and S. N. Bousias, "Strengthening of Infilled Reinforced Concrete Frames with TRM: Study on the Development and Testing of Textile-Based Anchors," J. Compos. Constr., 2013. (doi: https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000390.)
[5] A. D'Ambrisi, L. Feo, and F. Focacci, "Experimental analysis on bond between PBO-FRCM strengthening materials and concrete," Compos. Part B Eng., 2013. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.03.011.)
[6] A. D'Ambrisi, L. Feo, and F. Focacci, "Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete," Compos. Part B Eng., 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.002.)
[7] T. C. Triantafillou, Textile Fibre Composites in Civil Engineering. 2016. (doi: https://doi.org/10.1016/C2014-0-01415-3.)
[8] L. Garmendia, P. Larrinaga, R. San-Mateos, and J. T. San-José, "Strengthening masonry vaults with organic and inorganic composites: An experimental approach," Mater. Des., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.150.)
[9] L. Garmendia, J. T. San-José, D. García, and P. Larrinaga, "Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material," Constr. Build. Mater., 2011. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.065.)
[10] Z. C. Tetta, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams," Compos. Part B Eng., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.055.)
[11] J. Yao, J. G. Teng, and J. F. Chen, "Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints," Compos. Part B Eng., 2005. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.06.001.)
[12] K. V. Subramaniam, C. Carloni, and L. Nobile, "Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete," Eng. Fract. Mech., 2007. (doi: https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.09.002.)
[13] J. F. Chen and J. G. Teng, "Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete," J. Struct. Eng., 2001. (doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(784).)
[14] J. G. Teng, J. F. Chen, and S. T. Smith, "Debonding Failures in FRP-Strengthened RC Beams: Failure Modes, Existing Research and Future Challenges," 2008. (doi: https://doi.org/10.1061/40596(264)16.)
[15] M. Angelillo, E. Babilio, L. Cardamone, A. Fortunato, and M. Lippiello, "Some remarks on the retrofitting of masonry structures with composite materials," Compos. Part B Eng., 2014. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.025.)
[16] R. Fedele and G. Milani, "Assessment of bonding stresses between FRP sheets and masonry pillars during delamination tests," Compos. Part B Eng., 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.080.)
[17] F. Ceroni, B. Ferracuti, M. Pecce, and M. Savoia, "Assessment of a bond strength model for FRP reinforcement externally bonded over masonry blocks," Compos. Part B Eng., 2014. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.028.)
[18] Fib, Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. 2001.
[19] CNR-DT 200 R1-2013,2013
[20] TR55 Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials., "Concr. Soc.,2012
[21] American Concrete Institute. ACI 440.2R-17,2017.
[22] R. Kalfat, R. Al-Mahaidi, and S. T. Smith, "Anchorage Devices Used to Improve the Performance of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with FRP Composites: State-of-the-Art Review," J. Compos. Constr., vol. 17, no1, pp. 14–33, 2011. (doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000276.)
[23] S. V. Grelle and L. H. Sneed, "Review of Anchorage Systems for Externally Bonded FRP Laminates," Int. J. Concr. Struct. Mater., vol. 7, no. 1, pp. 17–33, 2013. (doi: https://doi.org/10.1007/s40069-013-0029-0.)
[24] S. M. Raoof, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Bond between textile-reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: Experimental investigation," Compos. Part B Eng., 2016. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.041.)
[25] L. N. Koutas, Z. Tetta, D. A. Bournas, and T. C. Triantafillou, "Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review," J. Compos. Constr., 2018. .(doi: https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000882.)
[26] S. M. Raoof, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams," Constr. Build. Mater., 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023.)
[27] F. Bencardino, C. Carloni, A. Condello, F. Focacci, A. Napoli, and R. Realfonzo, "Flexural behaviour of RC members strengthened with FRCM: State-of-the-art and predictive formulas," Compos. Part B Eng., 2018. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.051.)
[28] E. Grande and G. Milani, "Interface modeling approach for the study of the bond behavior of FRCM strengthening systems," Compos. Part B Eng., 2018. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.052.)
[29] S. Babaeidarabad, G. Loreto, and A. Nanni, "Flexural Strengthening of RC Beams with an Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix," J. Compos. Constr., 2014. (doi: https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000473.)
[30] U. Ebead, K. C. Shrestha, M. S. Afzal, A. El Refai, and A. Nanni, "Effectiveness of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix in Strengthening Reinforced Concrete Beams," J. Compos. Constr., 2016. (doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000741.)
[31] ACI 549.4R-13, 2013
[32] R. Kalfat and R. Al-Mahaidi, "Improvement of FRP-to-concrete bond performance using bidirectional fiber patch anchors combined with FRP spike anchors," Compos. Struct., 2016. (doi:10.1016/j.compstruct.2016.08.010)
[33] S. J. Kim and S. T. Smith, "Pull-Out Tests on Frp Anchors," Proc. Asia-Pacific Conf. FRP Struct., no. Apfis, pp. 775–782, 2007.
[34] T. Ozbakkaloglu and M. Saatcioglu, "Tensile Behavior of FRP Anchors in Concrete," J. Compos. Constr., vol. 13, no. 2, pp. 82–92, 2009. (doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:2(82))
[35] P. V. Llauradó, J. Fernández-Gómez, and F. J. González Ramos, "Influence of geometrical and installation parameters on performance of CFRP anchors," Compos. Struct., vol. 176, pp. 105–116, 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.035.)
[36] H. W. Zhang and S. T. Smith, "Influence of FRP anchor fan configuration and dowel angle on anchoring FRP plates," Compos. Part B Eng., vol. 43, no. 8, pp. 3516–3527, 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.072.)
[37] H. W. Zhang and S. T. Smith, "FRP-to-concrete joint assemblages anchored with multiple FRP anchors," Compos. Struct., vol. 94, no. 2, pp. 403–414, 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.07.025.)
[38] T. Ozbakkaloglu, C. Fang, and A. Gholampour, "Influence of FRP anchor configuration on the behavior of FRP plates externally bonded on concrete members," Eng. Struct., vol. 133, pp. 133–150, 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.005.)
[39] P. Villanueva Llauradó, "Influencia de las condiciones de ejecución en la resistencia de anclajes de fibra de carbono para refuerzos en estructuras de hormigón," Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
[40] N. Eshwar, A. Nanni, and T. J. Ibell, "Performance of two anchor systems of externally bonded fiber-reinforced polymer laminates," ACI Mater. J., vol. 105, no. 1, pp. 72–80, 2008.
[41] C. W. Niemitz, "Anchorage of carbon fiber reinforced polymers to reinforced concrete in shear applications," University of Massachustetts Amherst, 2008.
[42] P. Villanueva Llauradó, T. Ibell, J. Fernández Gómez, and F. J. González Ramos, "Pull-out and shear-strength models for FRP spike anchors," Compos. Part B Eng., vol. 116, pp.239-252, 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.029.)
[43] W. Sun, H. Liu, Y. Wang, and T. He, "Impacts of configurations on the strength of FRP anchors," Compos. Struct., 2018. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.020.)
[44] E. del Rey Castillo, D. Dizhur, M. Griffith, and J. Ingham, "Experimental testing and design model for bent FRP anchors exhibiting fiber rupture failure mode," Compos. Struct., 2019. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.091.)
[45] N. Gattesco and I. Boem, "Characterization tests of GFRM coating as a strengthening technique for masonry buildings," Compos. Struct., 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.043.)
[46] E. Bernat-Maso, C. Escrig, C. A. Aranha, and L. Gil, "Experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wallettes," Constr. Build. Mater., 2014. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.031.)
[47] V. Alecci, M. De Stefano, R. Luciano, L. Rovero, and G. Stipo, "Experimental Investigation on Bond Behavior of Cement-Matrix-Based Composites for Strengthening of Masonry Structures," J. Compos. Constr., 2015. (doi: https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000598.)
[48] D. A. Bournas, A. Pavese, and W. Tizani, "Tensile capacity of FRP anchors in connecting FRP and TRM sheets to concrete," Eng. Struct., 2015. (doi:10.1016/j.engstruct.2014.10.031.)
[49] F. González, J. Fernández, G. Agranati, and P. Villanueva, "Influence of construction conditions on strength of post installed bonded anchors," Constr. Build. Mater., 2018. (doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.144.)
[50] S. J. Kim and S. T. Smith, "Pullout Strength Models for FRP Anchors in Uncracked Concrete," J. Compos. Constr., 2010. (doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000097.)
[51] S. F. Breña and G. N. McGuirk, "Advances on the Behavior Characterization of FRP-Anchored Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Sheets Used to Strengthen Concrete Elements," Int. J. Concr. Struct. Mater., 2013. (doi: https://doi.org/10.1007/s40069-013-0028-1.)
[52] H. W. Zhang, S. T. Smith, and S. J. Kim, "Optimisation of carbon and glass FRP anchor design," Constr. Build. Mater., vol. 32, pp. 1–12, 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.100.)
[53] S. L. Orton, J. O. Jirsa, and O. Bayrak, "Design Considerations of Carbon Fiber Anchors," J. Compos. Constr., vol. 12, no. 6, pp. 608–616, 2008. (doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:6(608).)
[54] E. Tzoura and T. C. Triantafillou, "Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets," Mater. Struct. Constr., 2016. (doi: https://doi.org/10.1617/s11527-014-0470-9.)
[55] T. Trapko, D. Urbańska, and M. Kamiński, "Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites," Compos. Part B Eng., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.024).
[56] A. Cortez, J. Fernández, and P. Villanueva, "Advances in FRP anchoring systems for externally bonded carbon fibre reinforcements," in CITE, 2019, pp. 106–108.
[57] H. Zhang, S. T. Smith, R. J. Gravina, and Z. Wang, "Modelling of FRP-concrete bonded interfaces containing FRP anchors," Constr. Build. Mater., 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.080.)

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9242-1.pdf

Análisis estructural de una nueva prótesis con estructura interna para reemplazo de tobillo



Structural analysis of a new total ankle replacement prosthesis with internal structure

Humberto Corro-Hernández, Agustín Vidal-Lesso, Elías Ledesma-Orozco y Luis-Manuel Palacios-Pineda

Universidad de Guanajuato. Departamento de Ingeniería Mecánica. División de Ingenierías. Campus Irapuato-Salamanca. Valle de Santiago Km. 3.5 - 36885 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto. (México)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9267 | Recibido: 31/05/2019 • Inicio Evaluación: 04/06/2019 • Aceptado: 30/08/2019

ABSTRACT

A new prosthesis design for total ankle arthroplasty, with an internal damping structure for the sacrifice component is proposed and analyzed considering experimental data for the material model.
Engineering parameters for prosthesis designs are proposed and discussed and physiological load conditions for ankle joint are applied for numerical simulation.
Performance of total deformation, strain, safety factors and equivalent stress of structured prosthesis are compared versus a common solid model and literature findings for market-available prosthesis.
Results showed that the proposed design can be deformed up to 52.85% compared to the solid model and operated safely on simulated cases. Prosthesis deformation generates a damped load transmission rather than a rigid one, closer to the natural ankle joint behavior.

Keywords: ankle joint prosthesis; finite element analysis; computer aided design; orthopedics.

RESUMEN

Se propone y analiza un nuevo diseño de prótesis para la artroplastia total del tobillo, con una estructura de amortiguación interna para el componente de sacrificio, teniendo en cuenta los datos experimentales del modelo de material.

Se proponen y discuten los parámetros de ingeniería para los diseños de prótesis y se aplican condiciones de carga fisiológicas para la articulación del tobillo para la simulación numérica.

Los resultados para deformación total, deformación unitaria, los factores de seguridad y el esfuerzo equivalente de las prótesis estructuradas se comparan con un modelo sólido genérico y los reportes de literatura para las prótesis disponibles en el mercado.

Los resultados mostraron que el diseño propuesto puede deformarse hasta un 52.85% en comparación con el modelo sólido y operarse de manera segura en los casos simulados. La deformación de la prótesis genera una transmisión amortiguada de carga en vez de rígida, más cercana a la operación natural de la articulación del tobillo.

Palabras clave: prótesis articular de tobillo; análisis de elementos finitos; diseño asistido por computadora; ortopedia.

1. INTRODUCCIÓN

La artroplastia total de tobillo (ATT) es una intervención quirúrgica para el tratamiento de casos avanzados de degradación del cartílago en el mismo. La ATT requiere la exposición de la articulación, separando los tendones, nervios y vasos sanguíneos para extirpar el hueso y el cartílago dañado. Tras dicha extracción, sustitutos artificiales son anclados al hueso remanente. Un tercer elemento, más suave, es ensamblado posteriormente, cuidando de tener el mejor ajuste y alineación. Por último, los tejidos blandos se colocan en su sitio y se sutura la herida [1]. Conforme el promedio de edad de la población va en aumento, la necesidad de ATT y otras intervenciones relacionadas aumentará [2] y por tanto el trabajo requerido para la obtención de nuevas soluciones de ingeniería en el diseño de prótesis.

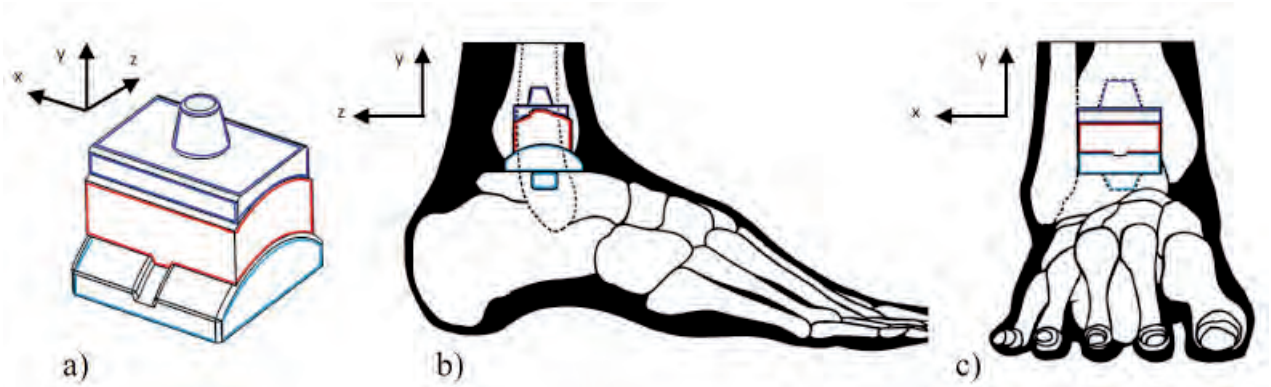


Fig. 1: Diseño de prótesis ATT a) Diseño b) Vista lateral externa c) Vista frontal de la articulación del tobillo derecho

Los implantes para ATT tienen una estructura básica con dos elementos metálicos o cerámicos adjuntos al hueso en tibia y astrágalo, y un componente medio de amortiguación, también conocido como componente de sacrificio (Figura 1). Este puede estar unido o no al componente tibial y tiene diferentes niveles de congruencia en las superficies de contacto. Las implicaciones de cada opción han sido exploradas en muchos diseños [1,3-4].

En comparación a cirugías similares, la ATT ha tenido un desarrollo menor, con la complejidad e inestabilidad inherente a la articulación del tobillo [3], la importancia de la interacción con el tejido blando [5], y mayores cargas de compresión [6] como los principales factores para este retraso. Sin embargo, la creciente demanda por parte de pacientes más jóvenes y activos [3] ha propiciado la búsqueda de nuevas soluciones para la ATT.

La principal fuente de falla para implante de tobillo es el aflojamiento causado por una mala fijación, micro movimientos del implante, la sobrecarga fisiológica durante el funcionamiento, reabsorción ósea, o frecuentemente una combinación de dichos factores [7]. Estas condiciones pueden provocar un desgaste prematuro, con la consecuente generación de esquirlas del componente de sacrificio, conduciendo a respuestas biológicas, tales como inflamación de tejido, aumento de presión del líquido intraarticular, necrosis y rechazo total de la prótesis [8]. Los niveles de esfuerzo en el componente de sacrificio son la causa fundamental de muchos de estos efectos [9]. La alteración de la marcha y cargas adicionales en la extremidad inferior están vinculados como otros efectos indeseables de este exceso de energía transmitida [10].

Se propone entonces la generación de un sistema de absorción de energía dentro de la prótesis ATT para extender su vida útil y la disminución de efectos adversos. En este desarrollo, se propone y analiza un nuevo diseño de geometría de prótesis con estructura de amortiguación interna por medio del método de los elementos finitos (MEF).

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1. MODELOS DE MATERIAL

El polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) de grado quirúrgico es el material por excelencia para su uso en el componente de sacrificio [11]. Siendo la principal fuente de falla para prótesis ATT, la precisión de la simulación del material es crucial.

El UHMWPE presenta cambios en su comportamiento mecánico en función de la temperatura, la carga aplicada y la tasa de carga a la que se someta [12]. Variación adicional puede derivarse de la esterilización, tratamientos superficiales, y el funcionamiento *in vivo* a largo plazo [13].

El ajuste de modelo de material se hizo a partir de los datos experimentales obtenidos de probetas grado quirúrgico de Lennite ® GUR1050 [14] sometidas a pruebas de compresión según la norma ASTM D695 [15]. Por su importancia, las pruebas mecánicas en la investigación de nuevos materiales susceptibles de ser utilizados como elementos de repuesto en el interior del cuerpo humano son esenciales para el diseño de prótesis [16].

Un modelo de material endurecimiento isotrópico bilineal (BIH) [17-18] fue elegido, siendo los parámetros utilizados para el modelo bilineal correspondientes con informes anteriores por Bowden et al [12] y el fabricante Westlake Plastics [19].

Para los componentes metálicos, se usaron propiedades materiales de una aleación de titanio Ti6Al4V [20], siendo implementadas sobre un modelo elástico lineal, con datos adicionales de fuerza y fatiga por Matweb [21].

La Tabla 1 resume las propiedades de materiales empleadas

GUR1050	Valor	Unidades
Módulo de Young	325.00	MPa
Coeficiente de Poisson	0.46	---
Límite de fluencia (BIH)	14.15	MPa
Módulo Tangente (BIH)	95.00	MPa
Límite de fluencia a tensión	20.00	MPa
Límite de fluencia a compresión	25.00	MPa
Tensión de ruptura	45.80	MPa
Resistencia máxima a compresión	39.60	MPa
Ti6Al4	Valor	Unidades
Módulo de Young	113.80	GPa
Coeficiente de Poisson	0.34	---
Límite Elástico	880.00	MPa
Límite de fluencia a compresión	970.00	MPa
Resistencia máxima a tensión	950.00	MPa
Resistencia a la fatiga	510.00	MPa

Tabla 1: Propiedades de materiales aplicadas

Además, las propiedades de material para UHMWPE fueron complementadas con la inclusión de un modelo de fatiga para GUR1050 a compresión hasta un 12% de deformación axial, según lo informado por Pruitt [22], vinculando el esfuerzo medio máximo permisible S con el número de ciclos operativos *N* (eq.1)

$$S = 26{,}3 - 2{,}38\ Log(N) \quad (1)$$

2.2. PROPUESTAS DE DISEÑO PARA PRÓTESIS ATT

Una prótesis para ATT de tres componentes fue diseñada en un software CAD comercial (SolidWorks®), usando el modelo de la estructura ósea de una extremidad inferior derecha [23]. Esta propuesta se basa en los datos antropométricos correspondiente a un varón de 1,80 m de altura. El diseño de prótesis obtenidos encaja en un bloque de 49.48 mm de altura, 38,48 mm de ancho y 39.00 mm de profundidad. Se conservan las dimensiones fisiológicas, lo que significa que las separaciones entre los huesos y la longitud de los mismos no fueron modificadas. Es importante tener en cuenta que los mejores candidatos para la ATT tienen una edad promedio de 60 años, un peso de 65 kg y una buena salud general, pues enfermedades crónicas comprometen el éxito de la intervención [3]. En caso de escalación del diseño de prótesis para otros pacientes, debe hacerse trabajo adicional para obtener las dimensiones adecuadas.

Siendo la creación personalizada de prótesis más reciente, el método más común para el diseño de prótesis ATT el mercado consistía en la fabricación de tallas diferentes, con los cirujanos realizando pequeños ajustes para una buena alineación de la prótesis durante la operación [3].

El anclaje axial de la prótesis mediante un eje de ancho variable y sin cemento de fijación demostró ser útil para evitar el aflojamiento [9]. Por lo tanto, el componente tibial fue diseñado con un tallo de anclaje, característica vista en prótesis comerciales como Mobility™ [24] o INBONE® [25]. La longitud del tallo fue reducida para evitar una penetración excesiva, potencialmente perjudicial para la fijación [26].

El objetivo principal de este trabajo es la reducción de esfuerzos en el componente de sacrificio (Figura 2). En este sentido, la

ampliación de la superficie de contacto en sacrificio componente ha sido probada con éxito en la prótesis Agility™ [9,27].

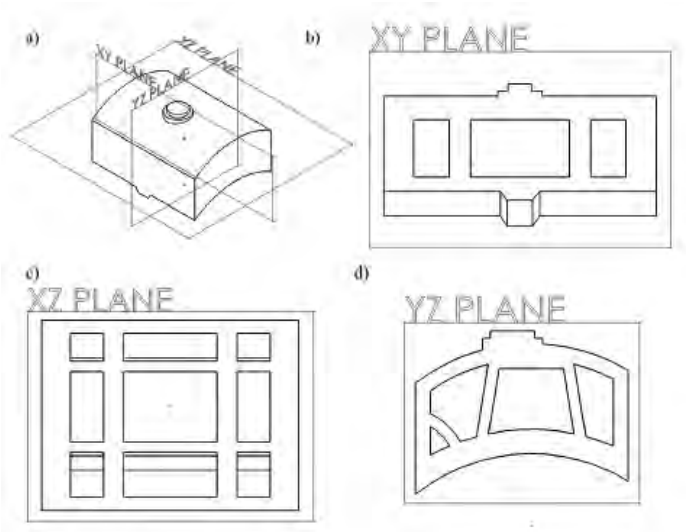


Fig. 2: Estructura interna del componente de sacrificio) vista isométrica b) sección transversal lateral c) sección transversal d) sección transversal frontal

El uso de oquedades en el interior de dispositivos ortopédicos se ha demostrado eficaz para reducir el peso y aumentar la flexibilidad, evitando cargas excesivas en las extremidades. En una concesión de patente anterior, S*istema de amortiguación, para prótesis de rodilla y cadera* [28] se ha sugerido que el uso de vanos dentro de componentes de UHMWPE puede reducir el desgaste en prótesis para artroplastia. No obstante, aún no se tiene disponibles resultados específicos para desarrollos completos de prótesis. La principal contribución presente es la aplicación del concepto a un diseño de prótesis ATT, centrándose en el concepto de viabilidad mediante la simulación de pruebas.

Por medio de un módulo de optimización comercial, aplicado a la geometría base del componente de sacrificio, se propuso una configuración interna de una matriz regular de 12 cavidades prismáticas.

El componente de sacrificio está fijado al componente tibial mediante un hueco, limitando el desplazamiento. Sin embargo, el primero se puede deslizar por encima del componente talar, siguiendo el movimiento de flexión plantar del pie [29]. El componente talar es totalmente congruente. Una guía en la superficie superior permite una buena alineación, fundamental para una intervención exitosa [3,5]. Así, se prevé la limitación de movimiento lateral a cambio de mayor estabilidad. El componente talar está fijo al astrágalo por su superficie inferior.

A fin de comparar el rendimiento de un componente de sacrificio estructurado contra uno sólido en las mismas condiciones, también fue analizado el diseño con el componente de sacrificio sin huecos.

2.3. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (AEF)

Los modelos CAD fueron exportados al software comercial de elementos finitos ANSYS Workbench® para un análisis estático estructural [18].

En un primer caso, la condición de frontera más sencilla para simular la carga de tobillo es la aplicación de una carga axial única (3650 N), siendo ésta la carga dinámica máxima aplicada durante la marcha normal de una persona de 65 kg [30-31]. Este valor se añade a la parte superior de la superficie del ensamble, manteniendo el extremo inferior fijo, con el pie en paralelo con el suelo.

Un segundo conjunto de condiciones de carga es citado por Reggiani et al [32], el cual se ha tomado para profundizar más la robustez del diseño. Además de la carga axial principal, fuer-

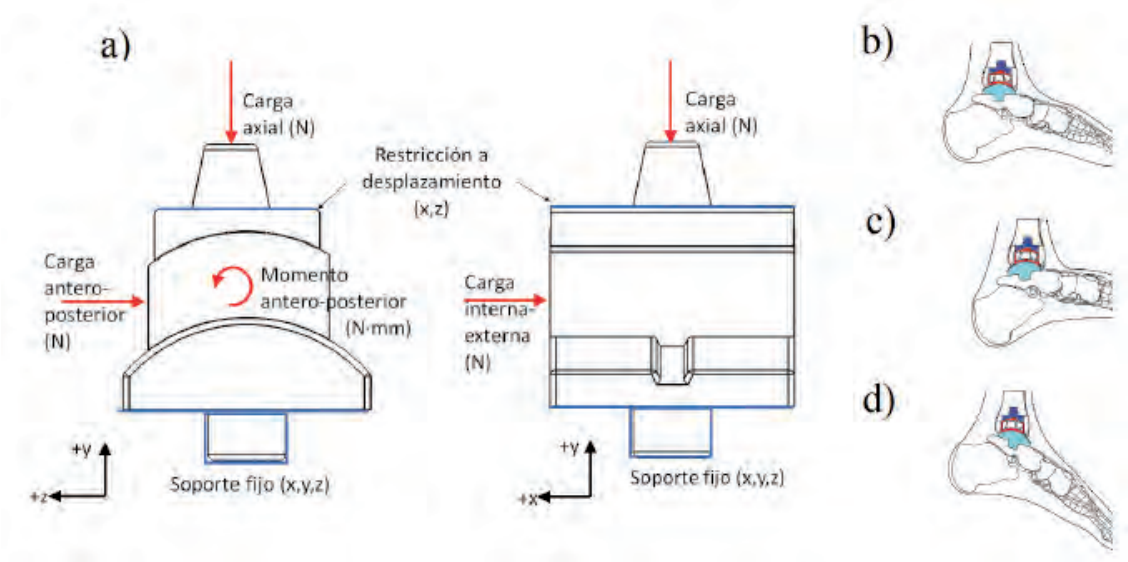


Fig. 3: a) Condiciones de frontera aplicadas con la posición correspondiente b) axial simple, neutral, c) dorsiflexión, d) flexión plantar

Condiciones de carga	Ángulo de referencia en el plano de trabajo (grados)	Carga axial (N)	Carga antero-posterior (N)	Carga Interna-Externa (N)	Momento antero-posterior (N. mm)
Axial simple	0	-3650	0	0	0.00
Neutral	0	-600	-280	150	2.85
Dorsiflexión	-10	-1.600	-185	-185	6.20
Flexión plantar	15	-400	-245	100	-0.10

Tabla 2: Cargas de tobillo utilizadas como condiciones de frontera

zas laterales y momentos son tomados en consideración. Para estas condiciones, tres posiciones diferentes había sido nombradas como neutral (original), flexión plantar máxima y dorsiflexión máxima. Estas se han configurado siguiendo el ángulo de referencia en el plano de trabajo.

Para el análisis de fatiga, estas condiciones se consideran en carga constante, de base cero, utilizando el criterio de Soderberg para falla a fatiga [18]. Además, se agregó una restricción de desplazamiento en la superficie superior del componente tibial, pues el contacto directo con tibia no permite la rotación rígida.

En suma, se usaron cuatro diferentes conjuntos de condiciones de frontera (Figura 3), teniendo ocho casos de simulación (mostrados en la Figura 3, descritos en la Tabla 2) para componentes de sacrificio sólidos y estructurados.

El contacto superior del componente tibial y de sacrificio era considerado como fijo, puesto que la prótesis es considerada como semirrestringida. En contraste, el contacto entre los componentes de sacrificio y talar permite el deslizamiento. En ambos casos la fuerza tangencial aplicada en un nodo se rige por la ecuación (Eq.2):

$$F_t = k_t x_s \tag{2}$$

Con k_t siendo la rigidez de contacto tangencial, y X_S, la distancia de deslizamiento.

La formulación de Lagrange aumentada fue agregada para la detección de contacto. La ecuación gobernante Eq. (3) es muy similar a la Eq. (2) con el término aumentado λ que hace al contacto menos sensible a los cambios de rigidez normal.

$$F_n = k_n x_p + \tag{3}$$

Como los componentes metálicos y poliméricos tienen diferentes propiedades mecánicas, el factor de rigidez normal k_n se establece en 10 y la rigidez es recalculado cada iteración, reduciendo la penetración [18].

Se usaron elementos tetraédricos de ocho nodos, siendo favorecidos sobre elementos hexaédricos debido al uso de recursos computacionales y robustez [33]. La elección de las dimensiones se resolvió mediante una combinación de análisis de sensibilidad a la malla y eficiencia computacional. La idea del tamaño de elemento correcto para AEF se consideró desde el primer modelo constitutivo para UHMWPE, con la simulación de las pruebas de compresión según las normas ASTM D695 [15]. Como una primera aproximación se usó un límite de 1,00 mm de arista. Esta elección preliminar pareció adecuada, basado en las dimensiones del componente de sacrificio en las zonas más delgadas, donde se esperaba la presencia de concentradores de esfuerzos.

Elementos de arista más pequeña (0.75 mm) tuvieron soluciones con valores similares en deformación, deformación unitaria y esfuerzo bajo las mismas condiciones, pero con un excesivo coste computacional, de al menos el 50% de tiempo adicional para el tamaño más grande. Las simulaciones con elementos aún menores (0.50, 0.45 mm) tenían problemas de inestabilidad y deformación excesiva (*hourglassing)*.

Los elementos de aristas más grandes (1.1, 1.2 mm) dieron valores divergentes para esfuerzo, mientras que las deformaciones no mostraron sensibilidad a la malla. Una desventaja adicional para estos tamaños de elemento fue que en algunas de las zonas internas del componente de sacrificio estructurado no habría suficientes elementos para dar resultados representativos, siendo propensos a errores numéricos. Al final, se mantuvo la arista promedio de 1.00 mm.

3. RESULTADOS

Los resultados de interés para cada componente son: a) deformación total máxima, b) deformación unitaria equivalente máxima c) máximo esfuerzo equivalente de von Mises d) Factor de seguridad. Para el componente de sacrificio se examinaron también e) mínimo factor de seguridad a fatiga, y f) ciclos de operación mínima, puesto que para los otros componentes tenía un papel mínimo o no fueron afectados.

Siendo múltiples los resultados de simulación, se seleccionaron casos representativos para las Figuras, que muestra la distribución de la variable en el plano YZ para una mejor comparación entre elemento de sacrificio sólidos y estructurados.

En la Figura 4 se deduce que la geometría tiende al predominio del efecto de la carga axial en cualquier posición, tanto para caso sólido y estructurado. El componente de sacrificio estructurado tiene adicionalmente componentes de deformación en la zona posterior.

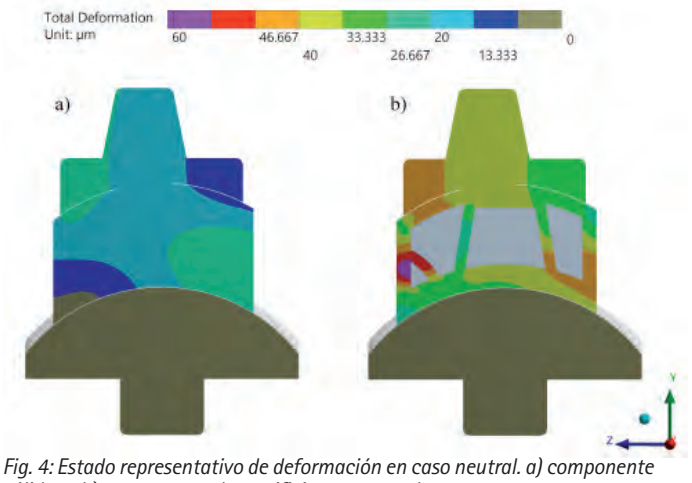


Fig. 4: Estado representativo de deformación en caso neutral. a) componente sólido vs b) componente de sacrificio estructurado

Sin embargo, las deformaciones máximas en los ensambles con elementos de sacrificio estructurados (0.31-0.33 mm) puede duplicar la media de su equivalente sólido (0.16 mm). El componente talar se deforma ligeramente sobre la superficie de contacto (0.0001-0.0006 mm).

La deformación unitaria tiene patrones similares de distribución (Figura 5) a la deformación, pero la presencia o falta de estructura interna en el componente de sacrificio demuestra cambios en la distribución.

El componente tibial tiene un comportamiento muy regular en varias posiciones para los dos casos (0.008-0.0017 mm/mm). En

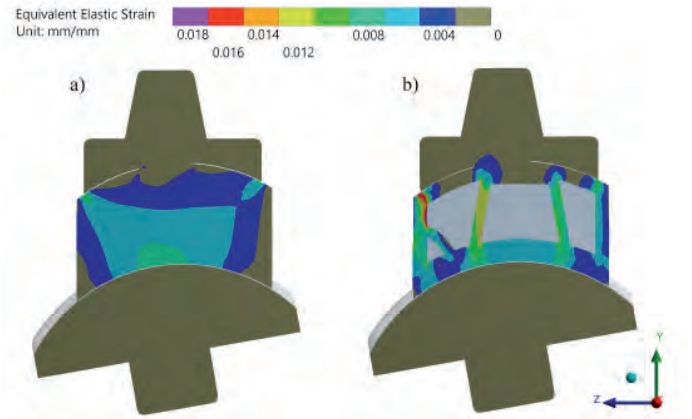


Fig. 5: Estado representativo de deformación unitaria en caso de dorsiflexión a) componente sólido vs b) componente estructurado

contraste, el componente de sacrificio tiene la deformación unitaria más notable, mientras que en el componente es mínima. El componente estructurado tiene mayores valores de deformación unitaria que su contraparte sólida (hasta 52.85% en promedio para todas las posiciones).

Para el elemento de sacrificio, la deformación unitaria es perceptible en los bordes de los vanos en la zona de contacto con el componente talar.

La distribución de esfuerzos (Figura 6) es más importante para la interpretación puesto que los casos analizados con AEF para ATT son más comunes [26,30,32].

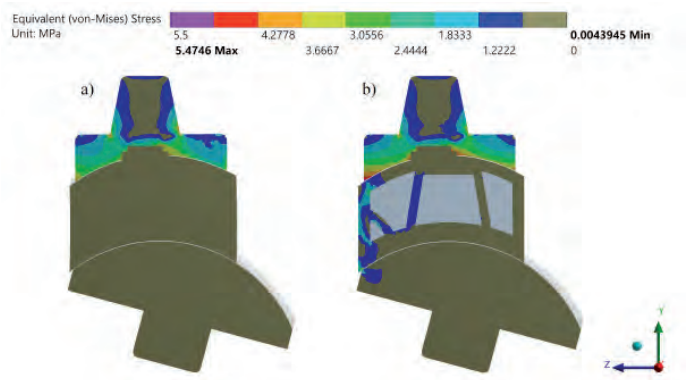


Fig. 6: Estado representativo de esfuerzo representativo en condiciones de carga de flexión plantar a) componente de sacrificio sólido y b) estructurado

Los componentes de sacrificio estructurados aumentan el máximo de los valores de esfuerzo en todas las posiciones. El componente de sacrificio tibial está sujeto a los mayores esfuerzos de todo el ensamble (61.23-99,38 MPa en valores pico). Las zonas de contacto en el componente talar tienen valores de esfuerzo máximo local (9.86-15.22 MPa). Cualquiera de los valores citados cae dentro de la operación segura de piezas de titanio.

El rango de operación segura para el UHMWPE del componente de sacrificio no debe exceder un esfuerzo de 20 MPa o superior [11]. En ningún caso se llega este valor. Los máximos valores de esfuerzos se alcanzan en posición de flexión plantar, en la zona de contacto con el componente talar (10.38 MPa para componente estructurado, 14.38 MPa para sólido).

Las caídas en los valores de factor de seguridad estático y a la fatiga son coincidentes con concentradores de esfuerzos. Sobre el análisis de fatiga y ciclos de vida mínima operativa para el componente de sacrificio estructurado en dorsiflexión y flexión plantar, puede fallar antes de un millón de ciclos (9.09E+05, 5,12E+05 respectivamente).

4. DISCUSIÓN

Es entendido que los valores mínimos para deformación y la deformación unitaria son más adecuados; al haber movimiento rígido en la prótesis, los tejidos blandos pueden sobrecargarse y afectar la extremidad inferior [3]. Para la referencia de modelo de material, existe un desplazamiento máximo admisible de 2 mm y una deformación unitaria admisible del 12% [22]. Estos límites no son superados.

Por otro lado, estudios cadavéricos con las prótesis Agility™ y STAR™ reportados por McInnes et al [34] para posiciones con carga y sin carga (150 y 300 N) denotan un desplazamiento relativo máximo de 0.5 mm para el componente tibial y un rango de 1-1.5 mm para componente talar. Teniendo en cuenta el primer criterio, el rendimiento es ligeramente mejor tanto para ensambles de componente sólido y estructurado.

Los resultados de simulación sobre micro movimiento de implantes para prótesis BOX®, Mobility™ y SALTO® muestra valores puntuales máximos en el rango de 0.01-0.02 mm para componente talar y 0.005-0.06 mm para componente tibial en posición neutra [35]. En virtud de este criterio, ninguno de los ensambles tiene un micro movimiento menor.

En contraste, el procesamiento de imágenes de pacientes de ATT pacientes con diseños de cojinete móvil reporta desplazamiento relativo en dirección anteroposterior del polietileno en relación con el componente tibial en un rango de 0-3 mm [36].

Como referencia, un cartílago de tobillo sano que carga el peso completo del cuerpo manifiesta una deformación unitaria máxima en el rango de 30-38%, con un promedio de 15% [37]. Los resultados probados en los modelos de componentes de sacrificio muestran valores promedio de 6-11% en flexión plantar, por lo que un funcionamiento de la prótesis más cercano a la amortiguación fisiológica del tejido sustituido es esperado.

Teniendo más referencias, el esfuerzo en el componente de sacrificio puede ser comparado en términos de eficiencia. Se ha reiterado que un esfuerzo superior a 20 MPa en el componente de sacrificio es excesivo para UHMWPE. Sin embargo, muchos AEF realizados para diseños disponibles en el mercado tienen picos mayores (26-36 MPa para Agitliy™ bajo 3330 N de carga axial; 20 MPa para STAR™ bajo 3650 N) en similares condiciones de carga [11]. Los resultados de la simulación de 24.365 MPa para Alvin Agility™ TR bajo 3430 N de carga son descritos por Vo et al [38]. Los valores obtenidos en este trabajo son menores para componente sólido y estructurado.

Desde intentos previos se ha demostrado que la ampliación del área de soporte en prótesis ATT disminuye los niveles de esfuerzo [9]. El cambio de diseño desde la anatomía original puede repercutir beneficiosamente en tejidos blandos, como ha sido descrito para BOX® [11], y la congruencia total de las superficies cilíndricas de los componentes talar y de sacrificio reduce la presencia de concentradores de esfuerzo. Esto es apoyado por los resultados obtenidos para el componente de sacrificio sólido.

La presencia de vanos aumentó los valores pico de esfuerzo en el componente de sacrificio, habiendo una variación de más del 25-27%, todavía dentro de los límites de operación, pero ciertamente en detrimento del objetivo de la estructura interior.

Se encontró que el componente tibial estaba asociado a los más altos valores de esfuerzo. Esto son valores compartidos con algunos reportes anteriores [11,35,39], sugiriendo la necesidad de un mejor método de anclaje y una investigación a mayor profundidad sobre los efectos sobre el hueso.

Claramente el componente talar propuesto es un diseño robusto. En contraparte, si éste es demasiado pesado puede ser perjudicial para un astrágalo dañado.

Se obtuvo un rango de 1.1 a 1.5 para el factor de seguridad estático en el componente de sacrificio. Los factores de seguridad a la fatiga son menores. La mayoría de las normas y pruebas para fatiga puede oscilar entre 2-10 millones de ciclos de carga [40] por tanto, se requiere información adicional para la simulación del comportamiento del UHMWPE a largo plazo o bien pruebas de fatiga adicionales.

Por último, el ATT se realizaron simulaciones como sistemas aislados. Un futuro obligado enfoque será la inclusión de la propuesta de prótesis en una adecuada articulación del tobillo modelo, no sólo incluye a los tejidos óseos, pero al menos los principales tendones y ligamentos para ver los efectos de la monta en el tobillo.

5. CONCLUSIONES

Se analizó un nuevo diseño de prótesis para ATT por medio de AEF, la cual contiene un componente de sacrificio estructurado. Se propone la presencia de huecos dentro del mismo para disminuir los efectos adversos de sobrecarga en el miembro inferior. Para el material de éste (UHMWPE) se implementó un modelo de endurecimiento bilineal isotrópico. Se exploraron decisiones de ingeniería para los otros componentes. A fin de hacer una comparación, se probó un control con el componente de sacrificio sólido. A partir de los resultados numéricos de análisis estático estructura se concluye que la propuesta de prótesis para ATT es funcional y puede ser operada de manera segura. En ambos casos se compararon los parámetros de deformación y deformación unitaria; si bien los valores asociados eran siempre superiores para el diseño ahuecado, los cambios asociados a la rigidez permiten mayor flexibilidad y absorción de energía, aunque manteniéndose cerca del comportamiento fisiológico original de la articulación, evitando la transferencia de carga rígida al miembro inferior. La distribución del esfuerzo y los valores máximos dentro del cambio de componente de sacrificio con la utilización de una estructura hueca interior, quedando reducida en comparación con otros diseños de prótesis para ATT.

Mientras que los efectos adversos relacionados con el aflojamiento y falla de la prótesis se evitaron, para la vida útil estructural del mismo los resultados no son concluyentes. El diseño propuesto es todavía susceptible para una mayor optimización y mejora. Las pruebas experimentales en un prototipo ya fabricado y el efecto del ensamble de la prótesis sobre la articulación también deben ser explorados.

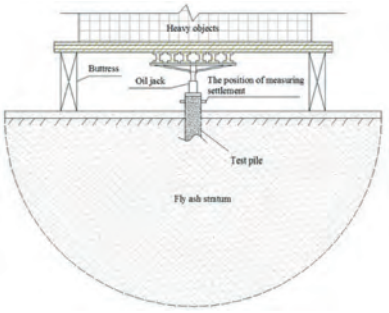
REFERENCIAS

[1] Demetracopoulos CA et al. "Total ankle arthroplasty in end-stage ankle arthritis". Curr Rev Musculoskelet, 2013. Vol. 6(4): p. 279–284. DOI: https://doi.org/10.1007/s12178-013-9179-6
[2] Cortés-Aburto O, Hernández-Pérez JA, Rojas-Rodríguez R. "Estudio sobre la implantación de prótesis de reemplazo total de rodilla" DYNA 2017 Vol. 92(5): p. 522-524. DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8137
[3] Gougoulias NE, Khanna A, Maffulli N. "History and evolution in total ankle arthroplasty". Br Med Bull 2009; Vol. 89(1): p. 111-151 DOI: https://doi.org/10.1093/bmb/ldn039
[4] Terrier A Fernandes CS, Guillemin M et al. "Fixed and mobile-bearing total ankle prostheses: Effect on tibial bone strain". Clin Biomech 2017. Vol. 48: p. 57-62 DOI: https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2017.07.009
[5] Vickerstaff JA, Miles AW, Cunningham JL. "A brief history of total ankle replacement and a review of the current status". Med Eng Phys 2007. Vol 29 (10):pp. 1056–1064 DOI: https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2006.11.009
[6] Gundapaneni D, Laughlin RT, Goswami T. "Characterization of retrieved total ankle replacement liners" Eng Fail Anal 2016 Vol. 70: p. 237–254. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.09.005
[7] Henricson A, Nilsson JA, Carlsson A. "10-year survival of total ankle arthroplasties: a report on 780 cases from the Swedish Ankle Register". Acta Orthop. 2011 Vol 82(6): p. 655–659 DOI: https://doi.org/10.3109/17453674.2011.636678
[8] Gaden MTR, Ollivere BJ. "Periprosthetic aseptic osteolysis in total ankle replacement: Cause and management". Clin Podiatr Med Surg. 2013; Vol. 30(2): p.145-155 DOI: https://doi.org/10.1016/j.cpm.2012.10.006
[9] Rodrigues, DSOS. "Biomechanics of the Total Ankle Arthroplasty: Stress Analysis and Bone Remodeling" [master's thesis] Instituto Superior Técnico. Universidad Técnica de Lisboa. 2013
[10] Doets HC, van Middelkoop M, Houdijk H et al. "Gait analysis after successful mobile bearing total ankle replacement". Foot Ankle Int. 2007 Mar; Vol. 28(3): p. 313-22. DOI: https://doi.org/10.3113/FAI.2007.0313
[11] Ianuzzi A., Mkandawire C. "Applications of UHMWPE in total ankle replacements" in Kurtz, S.M. ed., UHMWPE Biomaterials Handbook, 2nd ed, 2009, San Diego, California: Academic Press Elsevier, p. 153-169.
[12] Bowden AE, Oneida E, Bergström J. "Computer Modeling and Simulation of UHMWPE". in Kurtz, S.M. ed., UHMWPE Biomaterials Handbook, 2nd ed., 2009 San Diego, California: Academic Press Elsevier, p. 519-531
[13] Sobieraj M, Rimnac C. "Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: Mechanics, Morphology, and Clinical Behavior". J Mech Behav Biomed Mater, 2009 Vol. 2(5): p. 433–443. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2008.12.006
[14] Matweb.com. 2018. MatWeb - The Online Materials Information Resource [online] [Accessed 19/08/ 2018]. Available at: http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=0a722163160c4c53b7f40e1efb71c291
[15] ASTM. 2002. ASTM Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics (D695-02) ASTM International, West Conshohocken, PA, USA (2004)
[16] Moreno-Garibaldi P, Beltrán-Fernández JA, Hernández-Gómez LH et al. "Mechanical characterization of new biocompatible composite material focused on maxillofacial applications" DYNA, 2017 Vol. 92(4): p. 461-465. DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8100
[17] Gaertner EL, Giovani M, Bortoli, M. "Some Aspects for the Simulation of a Non-Linear Problem with Plasticity and Contact". Paper presented on International ANSYS Conference May 2-4, 2006, Pittsburg, PA
[18] ANSYS Inc. 2015. "ANSYS User's Guide Ansys 15. Educational version". Program documentation. SAS IP, Inc.
[19] Westlake Plastics.2018. Lennite ® Implant Grade. [Accessed 19/08 /2018]. http://www.sdplastics.com/westlake/lennite%20implant%20grade.pdf
[20] Park, JB, Kim YK. "Metallic Biomaterials" in Wong, JY., Bronzino, JD., ed. Biomaterials 1st ed., 2007, Boca Raton, Florida. CRC Press Taylor & Francis Group p. 6-10
[21] Matweb.com. 2018. MatWeb - The Online Materials Information Resource" [online] [Accessed 02/09 2018]. Available at: http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641
[22] Pruitt LA. "Deformation, yielding, fracture and fatigue behavior of conventional and highly cross-linked ultra-high molecular weight polyethylene". Biomaterials 2005 March; Vol. 26(8): p. 905–15. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2004.03.022
[23] Soria, C. (2016) "Tibia bone [CAD Model"] [Accessed 19/08 2018].Available at https://grabcad.com/library/tibia-bone-1
[24] Rippstein PF Huber M, Coetzee JC et al. "Total ankle replacement with use of a new three-component implant". J Bone Joint Surg [Am] 2011; Vol. 93-A: p. 1426–1435. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.03.022
[25] Total Ankle Institute. 2018. "INBONE™ Total Ankle System - Total Ankle Institute". [Accessed 20 Aug. 2018]. Available at: http://www.totalankleinstitute.com/inbone-products/inbone-ankle/
[26] Kakkar R, Siddique MS." Stresses in the ankle joint and total ankle replacement design". Foot Ankle Surg, Vol. 17(2): p. 58 – 63. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fas.2011.02.002
[27] Miller MC Smolinski P, Conti S et al. "Stresses in polyethylene liners in a semiconstrained ankle prosthesis". J Biomech Eng. 2004 Oct; Vol. 126(5): p. 636-40. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1798011
[28] Alonso-Maturana A. inventor. Sistema amortiguador para prótesis de rodilla y cadera. Comercial Maturana. SL ES 2538013B1 Spain. 2014 Dec. 30.
[29] Kapandji, AI J. Fisiología Articular. Tomo 2 Miembro inferior. Torres-Lacomba, M. (traducción) 5ta Edición. Castilla-La Mancha. Editorial Médica Panamericana. 1998. p. 160-177 ISBN: 9788479033743
[30] McIff TE, Saltzman C, Brown T. 2001. "Contact pressure and internal stresses in a mobile bearing total ankle replacement". Paper presented at 45th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society. San Francisco, CA; 2001 Feb. 25–28.
[31] Araiko M." Joint Forces within the Ankle During Level Walking". Paper presented on ANSYS conference &t26th CADFEM User's Meeting 2008. October 22-24, 2008- darmstadium wissenschaft/ kongresse, Dramstadt, Germany.
[32] Reggiani B, Leardini A, Corazza F et al. "Finite element analysis of a total ankle replacement during the stance phase of gait". J Biomech, 2006. Vol. 39(8): p. 1435-1443. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.04.010
[33] Maas SA, Ellis BJ, Rawlins DS et al. "Finite element simulation of articular contact mechanics with quadratic tetrahedral elements". J Biomech Vol. 49(5):p. 659-667 DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.01.024
[34] McInnes K, Oxland T, Younger A."Micromotion patterns at the bone-implant interface of a mobile-bearing and a semi-constrained total ankle replacement: an in vitro biomechanical study". Paper presented at AOFAS Annual Meeting 2012. San Diego CA Jun 20-23.
[35] Sopher RS, Amis AA, Calder JD et al. "Total ankle replacement design and positioning after implant-bone micromotion and bone strains". Med Eng Phys Vol. 42 (2017): p. 80-90. DOI: https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2017.01.022
[36] Lundeen GA, Clanton TO, Dunaway LJ et al. "Motion at the Tibial and Polyethylene Component Interface in a Mobile-Bearing Total Ankle Replacement". Foot Ankle Int Vol. 37(8): p. 848-854 DOI: https://doi.org/10.1177/1071100716643308
[37] Wan L et al. "In vivo cartilage contact deformation of human ankle joints under full body weight". J Orthop Res, Vol. 26(8):pp. 1081-1089. DOI: https://doi.org/10.1002/jor.20593
[38] Vo H, Tuvel B, Nguyen B et al. "Determination of the Neutral Axis in Total Ankle Replacement". Proceedings of 5th International Conference on Biomedical Engineering in Vietnam. IFMBE Proceedings, vol 46. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-11776-8_30
[39] Sturnick D, Saito G, Deland J et al. "Finite Element Analysis of Tibial Bone-Implant Load Transfer and Bone Strains with a modern Fixed- bearing Total Ankle Replacement". Paper presented at AOFAS Annual Meeting 2018 Boston, MA July 11 – 14. DOI: https://doi.org/10.1177/2473011418S00118
[40] Smyth, A Fisher J, Suñer S et al. "Influence of kinematics on the wear of a total ankle replacement". J Biomech 53: p. 105-110 DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.01.001

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen la contribución de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, por el uso de sus instalaciones.

Fly ash foundation reinforced by cement–soil mixing piles



Cimentación de cenizas volantes reforzadas con pilotes de mezcla cemento-tierra

Zhou Shengquan[1], Zhang Yongfei[1], Zhou Dawei[1], Wang Weijian[1], Ke Zhaibang[2] and Sudipta Halder[3]

[1] School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
[2] Anhui Key Laboratory of Green Building and Assembly Construction, Hefei 230032, China
[3] Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Silchar, Silchar 788010, India

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9364 | Recibido: 25/08/2019 • Inicio Evaluación: 25/08/2019 • Aceptado: 30/12/2019

RESUMEN

- Los pilotes de mezcla cemento-tierra se han utilizado comúnmente para mejorar la capacidad portante del estrato de cenizas volantes y mitigar los daños causados por el asentamiento en el medio ambiente circundante. Sin embargo, sólo el cemento se utiliza como agente de curado en estos pilotes. La tasa de crecimiento de la resistencia de los pilotes de mezcla cemento-tierra disminuye con el aumento del contenido de cemento. Por consiguiente, es necesario explorar los efectos combinados de varios agentes de curado sobre la resistencia de los pilotes de mezcla cemento-tierra. Sin embargo, se han realizado estudios poco frecuentes sobre el efecto de refuerzo del estrato de cenizas volantes mediante el uso de cal o yeso como materiales de sustitución eficaces del cemento en los pilotes cemento-tierra. En este estudio, se realizaron pruebas de laboratorio para comparar las leyes de variación de la resistencia a la compresión no confinada y a la cizalladura de las muestras de prueba antes y después del reemplazo. Luego, se evaluó el efecto de refuerzo de los pilotes de mezcla cemento-tierra en diferentes proporciones de cal-cemento y yeso-cemento. Los resultados demuestran que los pilotes de mezcla cemento-tierra con un 12% de contenido de cemento no sólo mejoran la capacidad portante de los pilotes de mezcla cemento-tierra, sino que también disminuyen la cantidad de cemento. Cuando la relación de reemplazo de yeso a cemento es de 1:2, la resistencia de 28 días de las muestras de ceniza de yeso y cemento y mosca alcanza el valor máximo de 4.5 Mpa. Cuando la relación de reemplazo de cal a cemento es de 1:1, la resistencia a la compresión no confinada de 28 días de las muestras de ceniza de mosca de cemento de cal es de 6.6 Mpa, la cual aumentó en un 46% en comparación con las de las muestras de ceniza de mosca de cemento puro. Por lo tanto, la resistencia de los pilotes de mezcla de cemento y suelo en el estrato de cenizas volantes puede mejorarse gracias a la combinación de cal y cemento. La racionalidad del diseño de los pilotes de mezcla de cemento y suelo sobre el factor se verifica aún más en la prueba de campo. Los resultados de este estudio pueden ser referenciados para la aplicación de pilotes de mezcla cemento-suelo en el estrato de refuerzo de cenizas volantes.
- **Palabras clave:** Pilotes de mezcla cemento-tierra, Resistencia a la compresión no confinada, Resistencia al cizallamiento, Estrato de cenizas volantes.

ABSTRACT

Cement-soil mixing piles have been commonly used to enhance the bearing capacity of fly ash stratum and mitigate the settlement damage to the surrounding environment. However, only cement is used as curing agent in traditional cement-soil mixing piles. The growth rate for strength of cement-soil mixing piles decreases with the rise in the cement content. Accordingly, it is necessary to explore the combination effects of various curing agents on the strength of cement-soil mixing piles. However, rare studies for the reinforcement effect of fly ash stratum have been conducted by using lime or gypsum as effective replacement materials of cement in cement-soil mixing piles. In this study, laboratory tests were performed to compare the variation laws of unconfined compressive and shear strength of test specimens before and after replacement. Then, the reinforcement effect of cement–soil mixing piles at different lime–cement and gypsum–cement replacement ratios was evaluated. Results demonstrate that the cement–soil mixing piles with 12% cement content not only enhance the bearing capacity of cement-soil mixing piles but also decrease the amount of the cement. When the gypsum-to-cement replacement ratio is 1:2, the 28-day strength of gypsum–cement–fly ash specimens reaches the peak value of 4.5 MPa. When the lime-to-cement replacement ratio is 1:1, the 28-day unconfined compressive strength of lime–cement–fly ash specimens is 6.6 MPa, which increased by 46% compared with those of pure cement–fly ash specimens. Thus, the strength of cement–soil mixing piles in fly ash stratum can be improved due to the lime–cement combination. The rationality of design in cement-soil mixing piles on the factor is further verified by the field test. The results of this study can be referenced for the application of cement–soil mixing piles in the stratum of fly ash reinforcement.

Keywords: Cement–soil mixing piles, Unconfined compressive strength, Shear strength, Fly ash stratum.

1. INTRODUCTION

Fly ash, a byproduct of coal combustion in thermal power plants, exhibits a light, porous and loose structures. Fly ash stratum refers to a type of weak stratum characterized by high moisture content and compressibility which is laid by fly ash [1–3]. These characteristics of fly ash stratum often lead to problems like serious subsidence and length time of settlement in engineering. Therefore, fly ash stratum must be reinforced as a bearing layer of the foundation. Existing engineering cases suggest that cement–soil mixing piles are often applied to stratum with high water content and compressibility as they can effectively enhance the bearing capacity and inhibit settlement [4–7]. The traditional cement–soil mixing piles adopt single cement as the curing agent, however, the strength of the cement-soil mixing piles increase slowly in the later period, thereby leading to the excessive use

of cement. As a result, the reinforcement effect is often limited [8–9]. So, the reinforcement of cement–soil mixing piles should be researched by the joint use of cement and other curing agent like lime or gypsum in detail.

As two commonly used curing agents, the mechanisms of lime and gypsum in improving the strength of cement–soil mixing piles have been investigated by many scholars. The mechanism can be summarized in the two aspects: (1) When gypsum is added into the fly ash, they can react with a small amount of active SiO_2 and Al_2O_3 in fly ash to produce hydration products (ettringite and sulfoaluminate). The reaction products constantly fill the pores and overlap with each other to continuously enhance the compactness of the structures [10–12]. (2) When lime is added into the fly ash, the surface of fly ash particles dissolve continuously in the alkali solution generated by lime to produce the ions $Al_2O_4^{2-}$ and SiO_3^{2-}. Ions $Al_2O_4^{2-}$ and SiO_3^{2-} interact with Ca^{2+} to form ettringite and calcium silicate hydrate, respectively. The resulting cementitious material overlaps with unhydrated fly ash particles to produce dense and hard solids [13–15]. Besides, lime can facilitate the early hydration reaction of cement as well as the later hydration effect of fly ash to reinforce the strength of mixing piles. The addition of lime or gypsum leads to different reinforcement results in cement-soil piles However, the reinforcement result is limited in the fly ash foundation because the increasing rate of strength is reduced in the later period with the rise of the single curing agent [16–19]. Accordingly, these results provide a theoretical basis for the study of adding gypsum or lime to the cement-soil mixing piles in fly ash stratum.

2. STATE OF THE ART

Cement–soil mixing piles refer to a method to reinforce fly ash stratum. Mohammad et al. [20] studied the compressive strength of cement–fly ash specimens under different cement contents. They found that the strength of the specimens was reinforced with the cement content. Telesca et al. [21] analyzed the mineral composition of cement–fly ash specimens. They found that increasing amount of $Ca(OH)_2$ was generated with the rise in cement content to promote the pozzolanic reaction and reinforce the strength of specimens. Moreover, the addition of gypsum could effectively reduce the shrinkage of specimens. Li et al. [22] studied the microstructure of cement–fly ash specimens and reported that the increase of strength in the cement–fly ash cementing system was attributed to the combination of particles with hydration products. Khatib et al. [23] compared the effects of the porosity and pore size of cement–fly ash specimens under different gypsum contents. They found that the rise in gypsum content only affected the pore volume slightly. Most of the mentioned studies focused on the variation laws in strength of the specimens formed by the reaction between fly ash and other curing agents like cement and gypsum. They also verified the variation laws of cement and gypsum on the expansibility of the specimens. These studies were mostly concentrated on the reaction of cement or gypsum with fly ash on the strength of the cementing system and the conclusions could lay a basis for the gypsum–to–cement replacement. However, the strength of cement–fly ash under a small amount cement which was replaced by gypsum has been rarely discussed. In the meantime, there is no description of curing time on the strength and the conclusions are not broadly applicable.

The addition of lime based on the cement greatly affects the fly ash stratum reinforcement. Prasanna et al. [24] compared the results of different lime contents (0%, 5%, 7%, and 10%) on the strength of lime–cement–fly ash specimens. They found that the unconfined compressive strength reached the peak value under 7% lime content, while the processability was reduced. Guan et al. [25] studied the early hydration reaction of cement and lime by using the thermal conductivity method and concluded that the nucleation effect of lime and cement up–regulate the speed of early hydration reaction. Guo et al. [26] explored the effect of curing time on strength by the unconfined compressive test. According to the results, the strength of lime–fly ash specimens was found to increase with the lime content. The strength maintained a rapid increasing rate in later curing time. Xiang et al. [27] found that the shear strength and cohesion of lime–fly ash specimens were greater than those of pure fly ash specimens. However, no great difference was observed in the internal friction angle. Compared with those of cement–fly ash specimens, the shear strength of lime–fly ash specimens with the same mixing ratio was higher. The mentioned studies above focused on the strength variation laws of lime-cement–fly ash or lime-fly ash specimens, while neglected the strength of cement–fly ash specimens which part of the cement was replaced by lime.

Accordingly, the stress–strain relationships of cement–fly ash specimens were analyzed in this study. The effects of different lime-to-cement and gypsum-to-cement replacement ratio on fly ash specimens were investigated. Subsequently, the shear test was performed to study the change laws of cohesion and internal friction angle. The relative properties of cement-fly ash specimens replaced by lime and gypsum were compared, according to the standard of *Technical code for ground treatment of buildings* (JGJ 79–2012), the change laws of cement-soil mixing piles by analyzing the relationship of unconfined compressive strength of specimens and vertical load capacity of single cement–soil mixing pile, the design was then verified accurately by performing a vertical compressive static load test. And then, a foundation was laid for the further investigation of cement–soil mixing piles.

The remaining parts of this study are organized as follows. Section 3 presents the detailed experimental scheme and specific steps. Section 4 analyzes the experimental data. Section 5 gives the summary and conclusions.

3. METHODOLOGY

3.1. EXPERIMENTAL MATERIALS

The fly ash employed in this study was collected from the Shangyao backfill fly ash yard in Huainan City, China. Besides, ordinary Portland cement with a strength level of 32.5 was adopted. The physical properties, basic chemical compositions, and particle size compositions of fly ash are listed in Tables I, II, and III, respectively.

Table I shows that the specific gravity of fly ash is 2.18, lighter than that of consolidated clay or sandy soil. The void ratio is larger than 1, and the liquid limit is 48.9, both higher than those of sandy soil. After being dried in the laboratory, fly ash specimens are prepared with 46.5% moisture content. The cohesive value c is 10.8 kPa, and the internal friction angle value φ is 28.52°.

Table II shows that SiO_2, Al_2O_3, and Fe_2O_3 takes up 85% of the fly ash composition, and the contents of C_ao, MgO and SO_3 are low. Thus, fly ash is considered low-calcium fly ash without self-hardening capacity. Table III indicates that the particle size of fly ash ranges from 0.25 to 0.075 mm, taking up 82.5%. No clay particles are present. Thus, the engineering properties of fly ash are similar to those of the sandy soil.

Basic Index	Moisture Content	Natural Gravity	Specific Gravity	Dry Density	Void Ratio	Saturation	Liquid Limit
	ω(%)	γ(kN/m³)	G_s	ρ_d(g/cm³)	e	Sr	W1(%)
Sample Size	10	10	10	10	8	10	8
Average	46.50	14.60	2.18	0.93	1.45	76.80	48.90

Table I: Physical properties of fly ash

Chemical Composition	SiO_2	AL_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Loss on Ignition
Average	51.75	32.30	7.56	3.87	0.93	0.60	1.44

Table II: Chemical compositions of fly ash (%)

Particle Size Group	2–0.5	0.5–0.25	0.25–0.075	0.075–0.005	<0.005
Sample Size	8	8	8	8	8
Interval Value	0.7–3.3	8.5–12.3	79.6–83.6	2.3–6.8	0
Average	2.1	10.1	82.5	5.3	0

Table III: Particle size compositions of fly ash

3.2. EXPERIMENTAL APPARATUS

The unconfined compressive test and the shear test were accomplished using the WDT–100 machine and EDJ–2 shear apparatus. According to the standard of *Technical code for ground treatment of buildings* (JGJ 79–2012), the experiments were made in the test. The experimental apparatus and specimens are shown in Fig.1.

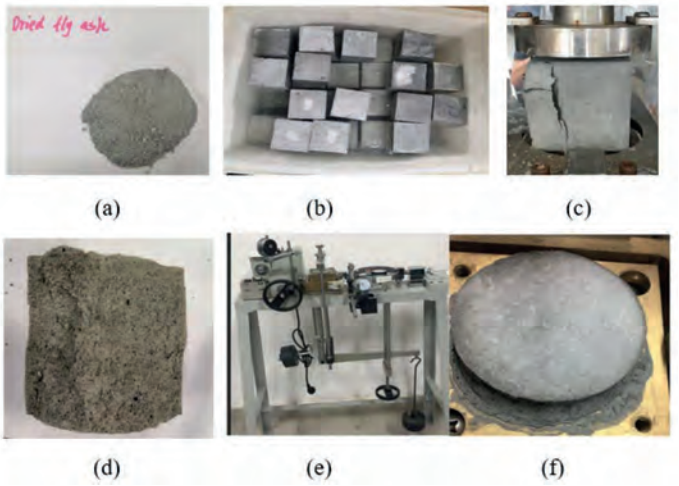


Fig. 1: Experimental apparatus and specimens. (a) Dried fly ash. (b) Maintenance condition. (c) Unconfined compressive test. (d) Failure form of specimens. (e) Shear apparatus (f) Specimens for shear test

3.3. EXPERIMENTAL SCHEME

Dried fly ash was added with water and the moisture content was kept to 46.5%. According to literature [28], the proper cement content in the cement–soil mixing piles taken up 6%–20%. The experimental scheme in this study was employed to replace cement with lime and gypsum in a certain proportion to obtain the optimal replacement ratio. Table IV lists the relevant parameters of cement–fly ash specimens, where a_w denotes cement content. The replacement ratio and other parameters in the unconfined compressive strength test are listed in TableV. The replacement ratio corresponds to the mass ratio of lime or gypsum to cement. The replacement ratio at 1:1 reveals that the mass of lime or gypsum takes up 50% of the total curing agent mass. The 1:2 replacement ratio reveals that lime or gypsum takes up 33.33% of the total curing agent mass. The 1:3 replacement ratio suggests that the mass of lime or gypsum is 25.00% of the total curing agent mass. For the unconfined compressive strength test, the cube mold with 70.7 mm length were taken. After the optimal cement, lime, and gypsum contents were obtained, the specimens were performed to a shear test. The shear test specimens were prepared by a cutting ring with an inner diameter of 61.8 mm and a height of 20 mm. Corresponding parameters in the direct shear test are listed in Table VI.

3.4. EXPERIMENTAL STEPS

The fly ash was dried in a high-temperature oven and then screened out through a 5 mm standard sieve. The experimental schemes in Table IV and V suggest that cement–fly ash, lime–cement–fly ash and gypsum–cement–fly ash were placed in a mortar mixer to mixed evenly, and the mixture was place in the mold (with release agents applied on the inner wall of the mold evenly). The mold with mixture was placed on the vibration table and then vibrated until no bubbles were discharged. Specimens were smoothed with a geotechnical knife and then covered with a fresh-keeping film. The specimens are placed in a saturated $Ca(OH)_2$ solution for curing. The specimens for shear test were made by a cutting ring. Lime–cement–fly ash and gypsum–cement–fly ash were mixed evenly according to table VI. Three specimens were taken from each group to conduct the unconfined compressive strength test. The loading rate was 0.5

Cement content a_w/%	Curing Time T/days			Moisture content ω/%
6	7	28	60	46.5
8	7	28	60	46.5
10	7	28	60	46.5
12	7	28	60	46.5
15	7	28	60	46.5

Table IV: Cement–fly ash specimens

Curing Agents %	Ratio of lime replacement cement	Ratio of gypsum replacement cement	Curing Time T/days		Moisture content ω/%
12	1:1	1:1	7	28	46.5
12	1:2	1:2	7	28	46.5
12	1:3	1:3	7	28	46.5

Table V: Parameters of gypsum and lime replacement cement

Curing Agents %	Ratio of lime replacement cement	Ratio of gypsum replacement cement	Curing Time T/days	Moisture Content ω/%
0	0	0	7	46.5
12	1:1	1:2	7	46.5

Table VI: Shear test parameters

mm/min. In the shear test, each group contained four specimens, and the specimens were tested at 0.8 mm/min shear rate.

4. RESULT ANALYSIS AND DISCUSSION

4.1. UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH ANALYSIS

Based on research results [28], the unconfined compressive strength of the indoor test can be used for the estimation of single cement–soil mixing pile characteristic vertical load capacity. The formula is

$$R_a=\eta \cdot f_{cu} A \quad (1)$$

R_a- the characteristic vertical load capacity of single cement soil pile, kN;
η- strength reduction factor, 0.20-0.33;
f_{cu}- unconfined compressive strength of test specimens, kPa;
A- cross section area of the pile, m^2.

Equation 1 gives the relationship between the characteristic vertical load capacity of single cement–soil mixing pile and the unconfined compressive strength of the specimens, indicating that the vertical standard load capacity of the single pile is proportional to the compressive strength of the specimens. By analyzing the variation law of the unconfined compressive strength of the test specimens, the variation characteristics of the vertical standard load capacity of the cement–soil mixing piles can be obtained.

Fig. 2 presents the stress–strain curves of cement–fly ash specimens with the increasing cement contents of 6%, 8%, 10%, 12%, and 15% for 7 and 28 days.

Fig. 2 suggests that the stress–strain curves of cement–fly ash specimens with low cement contents (6%, 8% and 10%) increases approximately linearly before failure and then decreases slightly after the failure strength is reached. A noticeable plastic failure occurs. With the rise in cement content, the strength of the specimens is enhanced, and the specimens gradually exhibits brittle failure.

Fig. 3 shows the effect of curing time on the strength of cement–fly ash specimens with cement contents of 6%, 8%, 10%, 12%, and 15% for 7, 28, and 60 days.

Fig. 3 shows that the unconfined compressive strength of cement–fly ash specimens with 6%, 8%, and 10% cement contents at the curing time of 7 days is 0.6, 0.7, and 0.8 MPa, respectively, and strength increase slowly. The unconfined compressive strength of the specimens with the cement contents of 12% and 15% reaches 1.5 and 2.5 MPa, respectively. Compared with 10% specimens cement content, strength increased by 87.50% and 212.50%. Under the curing time of 28 days, the unconfined compressive strength for the specimens with 6% and 8% cement contents is 1.6 and 2.4 MPa, respectively, and the latter increased by 0.8 MPa more than the former. The unconfined compressive strength with 10% cement content is 2.8 MPa, which increased by 0.4 MPa compared with that of the 8% cement content. The strength of specimens with 12% and 15% cement contents is 4.5 and 5.6 MPa, with an increase of 1.7 and 1.1 MPa, respectively. Thus, strength is significantly improved.

At the curing time of 60 days, the unconfined compressive strength with the cement content of 6% and 8% is 2.1 and 3.9 MPa, respectively. The latter increased by 1.8 MPa compared with the former. The strength of the specimens with 10% cement con-

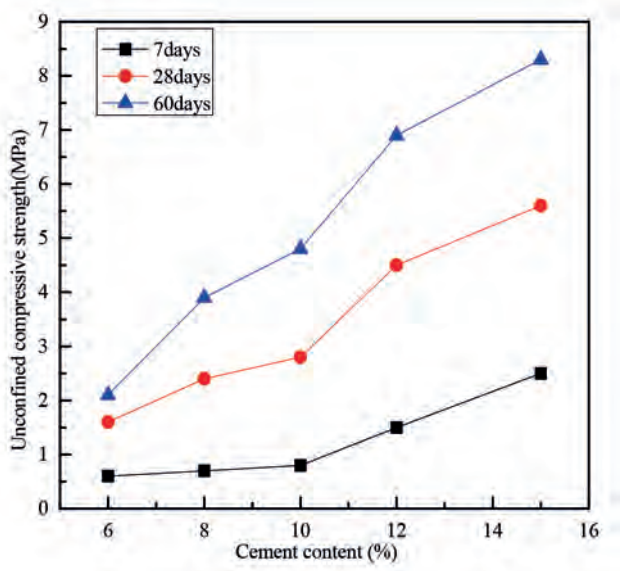


Fig. 3: Effect of curing time on the strength of cement–fly ash specimens

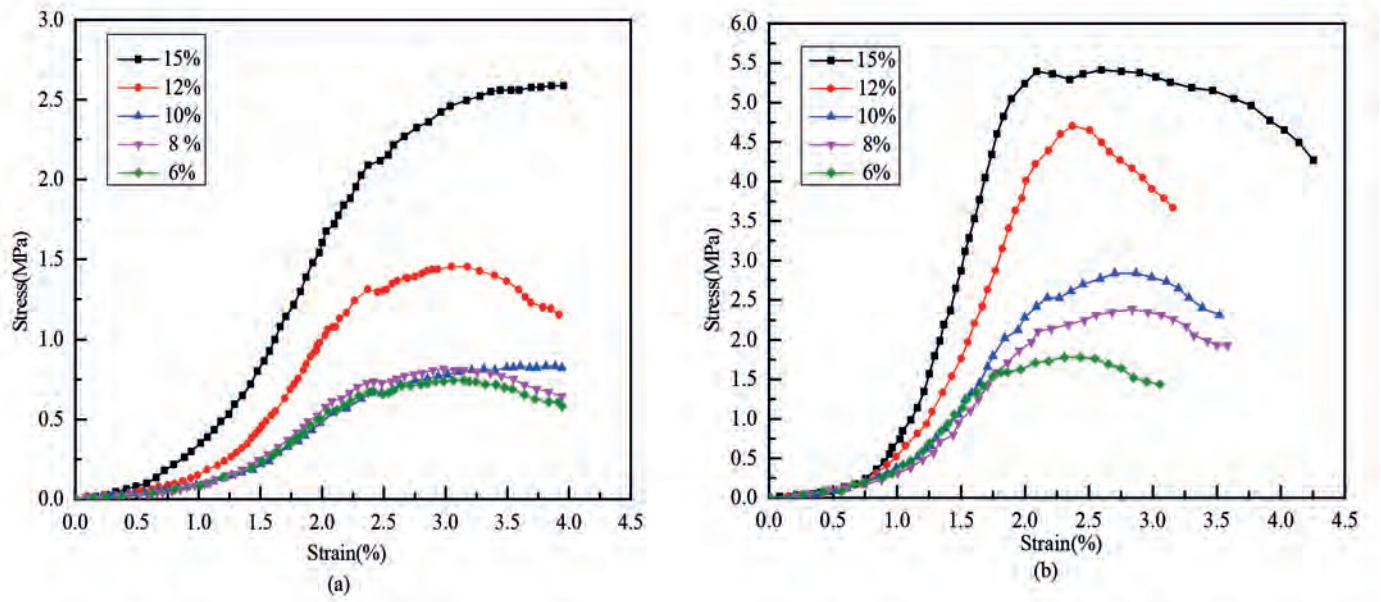


Fig. 2: Stress strain curves of cement–fly ash specimens. (a) 7 days. (b) 28 days

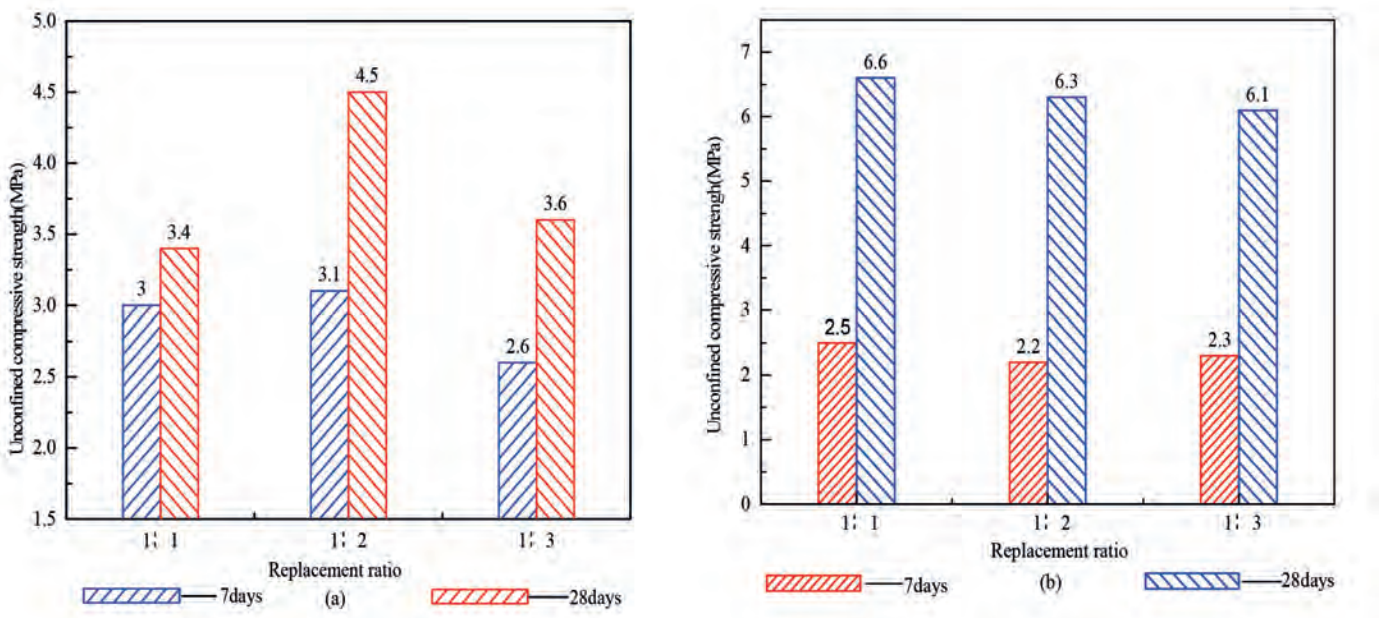


Fig. 4: Effect of the different curing agents on the unconfined compressive strength of specimens. (a) Gypsum–cement–fly ash specimens. (b) Lime–cement–fly ash specimens

tent is 4.8 MPa, marking a rise in 0.9 MPa compared with the cement content of 8%. The improvement of the strength is insignificant. The strength of the specimens with 12% cement content is 6.9 MPa, an increase of 2.1 MPa compared with the cement content of 10%, thereby presenting obvious improvement in strength. The strength of the specimens with 15% cement content is 8.3 MPa with an increase of 1.4 MPa compared with the cement content of 12%. These results reveal that the strength of specimens with 12% cement content at the curing time of 28 and 60 days has the greatest improvement, reaching 1.7 and 2.1 MPa, respectively. Considering the amount of cement in construction, the cement content of 12% is taken as the optimal and basic content of the later test. Given 12% of the basic ratio of the curing agent weight in cement-soil mixing piles, the unconfined compression tests were performed on the specimens prepared at part of cement which was replaced by gypsum or lime according to the experimental scheme (Table V). The results are shown in Fig. 4.

As is shown in fig. 4(a), under the condition of gypsum, the strength of gypsum-cement–fly ash specimens in the early curing time reaches high value. Under the curing time of 7 days, the unconfined compressive strength of gypsum–cement–fly ash specimens with the replacement ratio of 1:1, 1:2, and 1:3 is 3.0, 3.1, and 2.6 MPa, respectively. With the replacement ration is up-regulated from 1:1 to 1:3, the strength of the gypsum–cement–fly ash specimens shows the rule of fluctuation. The strength of the specimens increased by 100.00%, 106.69%, and 73.33%, respectively, compared with the cement–fly ash specimens with 12% cement content. At the curing time of 28 days, with the gradual decrease in the gypsum content, the strength of the specimens first rises and then decreases. When the gypsum-to-cement replacement ratio is 1:2, the unconfined compressive strength of gypsum–cement–fly ash specimens reaches the peaked value of 4.5 MPa, indicating no obvious change compared with the cement–fly ash specimens with 12% cement content. The results suggest that the replacement of cement with gypsum reinforces the early strength of cement–soil mixing piles which can shorten the construction period and improve engineering efficiency. However, with the increase of curing time, the long-term strength is slightly reinforced.

The variation laws of the strength are shown in fig. 4 (b). Under the condition of lime, the strength of lime–cement–fly ash specimens gradually decreases with the rising replacement ration. When the curing time is 7 days, the unconfined compressive strength of lime–cement–fly ash specimens with the replacement ratio of 1:1, 1:2 and 1:3 is 2.5, 2.2, and 2.3 MPa, respectively. However, the strength of the lime–cement–fly ash specimens is up-regulated by 66.67%, 46.67%, and 53.33% compared with the cement–fly ash specimens with a cement content of 12%. At the curing time of 28 days, the unconfined compressive strength of lime–cement–fly ash specimens is reduced from the initial 6.6 MPa to the final 6.1 MP, but compared with the cement–fly ash specimens with 12% cement content, the strength increased by 46.67%, 30.00%, and 35.56% At the lime-to-cement replacement ratio of 1:1, the unconfined compressive strength of lime–cement–fly ash specimens is peaked value, indicating that the lime-to-cement replacement positively affects the enhancement of cement–soil mixing piles strength.

4.2. DATA ANALYSIS OF SHEAR TEST

According to table VI, the shear test was performed with the specimens of fly ash, cement–fly ash, lime–cement–fly ash, gypsum–cement–fly ash. The results are illustrated in Fig. 5.

Figure 5 shows the internal friction angle and the cohesion of the fly ash specimens under the moisture content of 46.5% reach 28.52° and 10.8 kPa, respectively, while under 12% pure cement content are 45.21° and 176.2 kPa, marking a significant increase by 58.50% and 1500%. Under the condition of gypsum, the internal friction angle and the cohesion of the gypsum–cement–fly ash specimens are 38.7° and 207.6 kPa with the replacement ratio of 1:2, which increased by 35.63% and 17.8% compared with those of cement–fly ash specimens. After the addition of lime, the change of internal friction angle and the cohesion in lime–cement–fly ash specimens are obviously affected, under the replacement ration of 1:1, the internal friction angle and the cohesion marking reach peaked value of 48.5° and 242.65 kPa. The mentioned results reveal that the internal friction angle and the cohesion of the lime–cement–fly ash specimens at the lime-to-cement replacement ratio of 1:1 significantly rise, and the lime-to-cement replacement positively reinforces the strength of cement–soil mixing piles (the test data were obtained using the specimens at the curing time of 7 days).

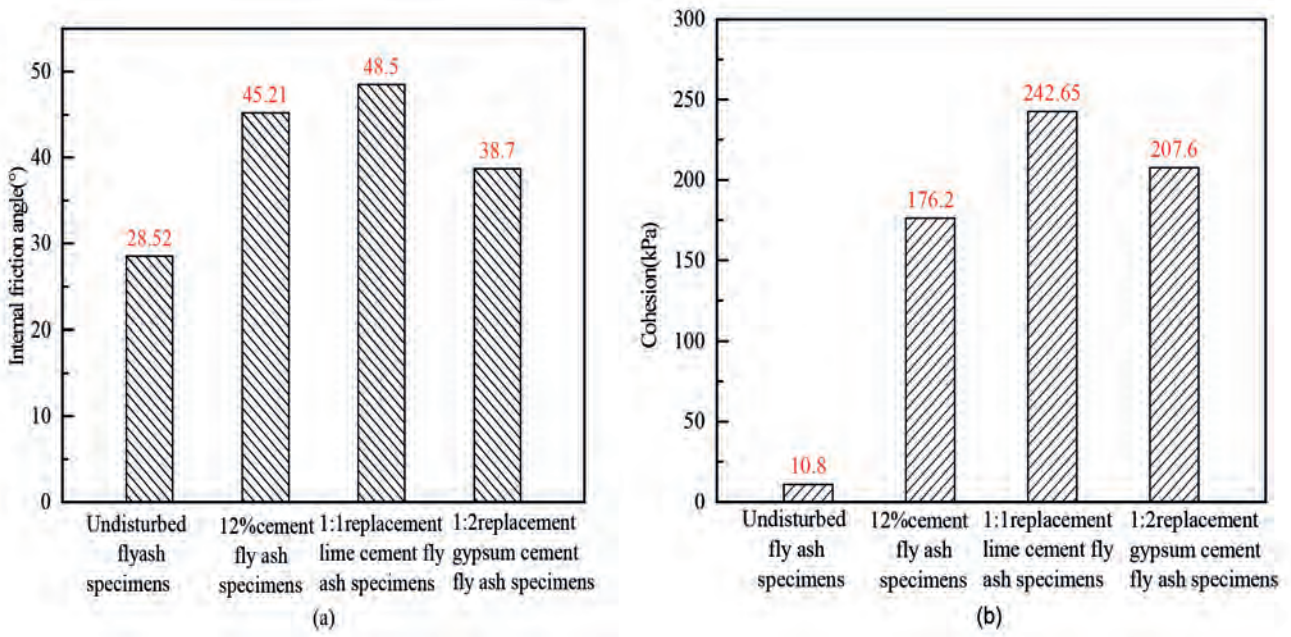


Fig. 5: Effect of different curing agents on the shear strength of specimens. (a) Effect of different curing agents on the internal friction angle of specimens. (b) Effect of different curing agents on the cohesion of specimens

4.3 TEST ON THE VERTICAL LOAD CAPACITY OF CEMENT-SOIL MIXING PILES

4.3.1. Experimental devices

The cement–soil mixing piles project in fly ash stratum is in the Shangyao, Huainan city, China. The content of cement is 12% in cement-soil mixing piles, the design value of vertical load capacity in a single cement-soil mixing pile is 100 kN. As is shown in the figure 6, the single pile vertical load capacity was detected by performing vertical compressive static load test. In the test, loads were applied using an oil jack, and the counterforce was provided by the upper heavy objects. The devices used in the test included JCQ–302 static loading device, MC–50 displacement sensor. The jack was placed vertical to apply the vertical load, two displacement meter were placed symmetrically at two sides of the testing pile to measure its displacement under vertical loads.

4.3.2 The test principle and method of vertical load capacity

Single-pile vertical load capacity test is performed by measuring settlement of the observation point under different vertical forces. In this method, the vertical load–pile top settlement relation curves are illustrated. The method of vertical compressive static load test is adopted according to *Technical code for testing of building foundation piles* (JGJ 106–2014). In the test, loading process was accomplished in accordance with the staged method of equivalent increment, the staged load value was the 1/10 of the maximum test loads. The first stage load value was twice as much as staged load. After each staged loading, the load was kept constant by 2 hours, and vertical settlement was measured every 30 minutes with 2 hours. Then the next staged load was loaded until the design load was reached.

4.3.3. Result analysis and discussion

The diameter of cement-soil mixing pile is 500 mm, and the pile length is 15000 mm, seven cement-soil mixing piles were tested by using vertical compressive static load test, they are numbered P1~ P7 respectively. The experimental results are shown in figure 7.

As is shown in figure 7, after load was increased to the maximum design value of 200 KN, the pile top settlement reached the standard. According to *Technical code for testing of building*

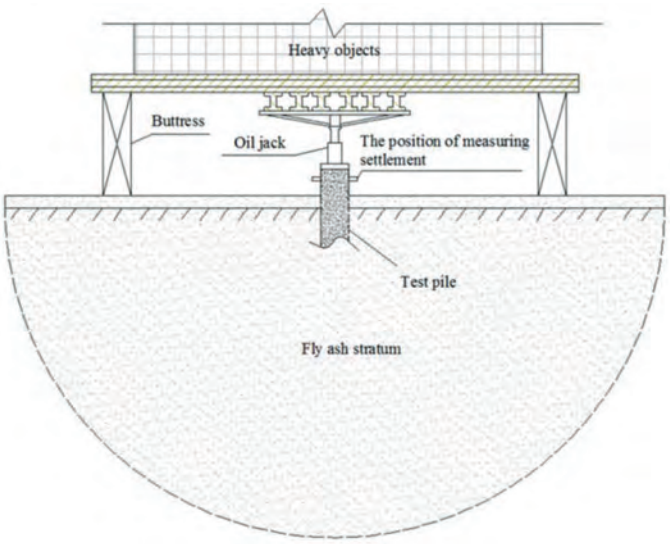


Fig. 6: Schematic diagram of vertical compressive static load test

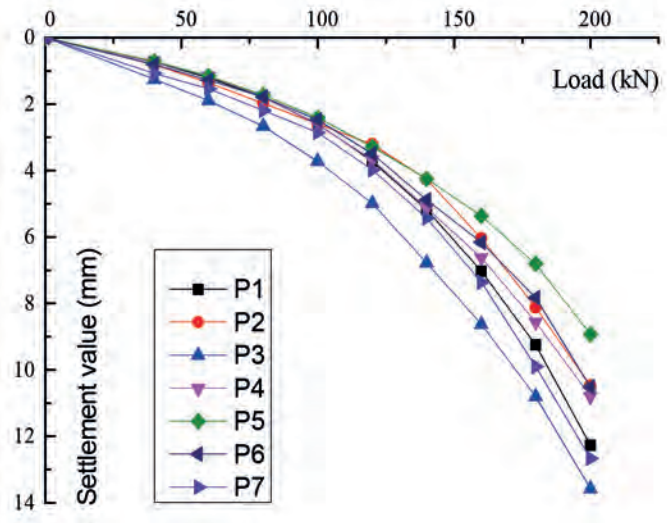


Fig. 7: Q-S curves of cement-soil mixing piles

foundation piles (JGJ 106-2014), the test was stopped. The Q-s relationship curve of cement-soil mixing pile varies gradually. The value of vertical ultimate load capacity in single pile is 200 kN, the characteristic vertical load capacity is 1/2 of the vertical ultimate load capacity, is 100 kN. The vertical compressive static load test indicates the cement-soil mixing piles with cement content of 12% meet the design requirements.

5. CONCLUSION

The optimal cement content was obtained first, and the unconfined compressive and shear test were performed on the lime–cement–fly ash specimens and gypsum–cement–fly ash specimens with different replacement ratio based on the different curing time. Lastly, a vertical load capacity of cement-soil mixing piles test was performed on seven cement-soil mixing piles. The characteristic value of vertical load capacity for the test piles was achieved through the curves of vertical load–pile top settlement. The following conclusions could be drawn.

The stress–strain curves of cement–soil mixing piles primarily display three stages (elastic, plastic, and failure). The strength of cement-soil mixing piles with 12% cement content is reinforced most significantly. Adding gypsum can improve early strength, the addition of lime in cement–soil mixing piles can effectively improve the later bearing capacity. The vertical characteristic load capacity of the cement-soil mixing piles is achieved on the basis of the field test. Combined with the result of field test and the formula 1, for replacement part of cement by lime when replacement ratio is 1:1, the vertical load capacity of cement-soil mixing piles increases significantly.

In this study, the effects of replacing cement with different curing agents on the reinforcement of cement–soil mixing piles in fly ash stratum are explored. The optimal replacement ratio of cement which is replaced by lime is obtained. This study can be referenced for engineering applications. However, as a curing agents, the engineering stability of lime is unremarkable. In the present study, the stability of lime–cement–fly ash specimens is not considered, and the durability of lime–cement–fly ash specimens requires further investigation.

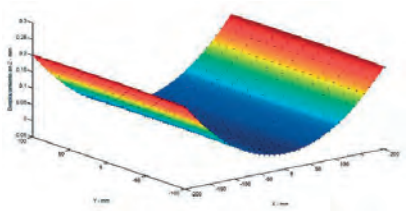
REFERENCES

[1] Yao ZT, Ji XS, Sarker PK, et al. "A comprehensive review on the applications of coal fly ash". Earth-science reviews. February 2015. Vol. 141. P.105-121. DOI: http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016
[2] Luo YS, Li J, Chan A. "Study on the engineering property of mixed-soil fly ash". Advances in Environmental Geotechnics. September 2009. Vol.8-10. p.721-727. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-04460-1_86
[3] Hemalatha T, Ananth Ramaswamy. "A review on fly ash characteristics-Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete ". Journal of Cleaner Production. March 2017. Vol. 147-20. p.546-559. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114
[4] Kim HK, Lee HK. "Coal bottom ash in field of civil engineering: A review of advanced applications and environmental considerations". KSCE Journal of Civil Engineering. September 2015. Vol. 19-6. p.1802 -1818. DOI: https://doi.org/10.1007/s12205-015-0282-7
[5] Darya Mokrousova, Matti Honkaniemi. "Ground improvement, practices in Russia, and finland possibilities of cooperation". Bachelor Thesis of Saimaa University. 2010. p.34-66.
[6] Tao WH, Liu ZM. "Cementitious property and hydration mechanism of desulphogy prism Lime fly ash system". Journal of University of Ji Na. July 2010. Vol. 24-3. p.233-237.
[7] Kim YS, Seo SG, Ko HW, et al. "Implementation of porous material through eco-tech for deep cement-soil mixing". Marine Georesources & Geotechnology. October 2018. Vol. 36-8. p. 931-939. DOI: https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1399944
[8] Ariozo Tokyay M, Arioz E. "Properties of fly ash–FHD gypsum-lime based products". Journal of the Australasian Ceramic Society. January 2006. Vol. 42-1. p.13-21.
[9] Meng Q, Shao L, Shi QY. "Experimental study on the mechanical properties of fly ash cement soil". University of Shanghai For Science and Technology. October 2017. Vol. 39-5. p.490-497. DOI: https://doi.org/10.13255/j.cnki.jusst.2017.05.013
[10] Qian W, He WX. "The study on mechanical properties of glass fiber and fly ash composite cement soil". The journal of Solid Waste Technology and Management. November 2018. Vol. 44-4. p. 361-369. DOI: https://doi.org/10.5276/JSWTM.2018.361
[11] Solikin M, Setiawan B. "Mechanical properties of class c high volume fly ash concrete with lime water as mixing water". Applied Mechanics and Materials. October 2014. Vol. 660. p. 312-316. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.660.312
[12] Tesarek P, Drchalova J, Kolisko J, et al. " Flue gas desulfurization gypsum: Study of basic mechanical, hydric and thermal properties ". Construction and Building Materials. July 2007. Vol.21-7. p.1500-1509. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.009
[13] Chen CH, Huang Y, Li GF. "Fly ash-desulfurization gypsum mortar and concrete Part II: Performances". Advanced Materials Research. May 2011. Vol. 243-249. p.6880-6886. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.6880
[14] Weerdt K De, Haha M Ben, Saout G Le, et al. "Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing Limestone powder and fly ash". Cement and Concrete Research. March 2011. Vol. 41-3. p.279-291. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014
[15] Aritra Pal. "Developing low–clinker ternary blends for Indian cement Industry". Journal of The Institution of Engineers(India): Series A. September 2018. Vol. 99-3. p.433-447. DOI: https://doi.org/10.1007/s40030-018-0309-4
[16] Roychand R, De Silva S, Law D, et al. "High volume fly ash cement composite modified with nano silica, hydrated lime and set accelerator". Materials and Structures. May 2016. Vol. 49-5. p.1997-2008. DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-015-0629-z
[17] A Rashid A S, Bunawan A R, Mat Said K N. "The deep mixing method: Bearing capacity studies". Geotechnical and geological engineering. August 2017. Vol 35-4. p.1271-1298. DOI: https://doi.org/10.1007/s10706-017-0196-x
[18] Vishal V Pagar, Vijaykumar Sharma. "Review of existing design methods for CFG (Cement-Fly Ash-Gravel) pile supported composite foundation embankment". International Journal of Engineering Technology Science and Research. March 2018. Vol. 5-3. p.799-806.
[19] Zhang HN, Chen S, Pei SX, et al. "Study on effect of the activated magnesia carbonized building blocks based on the content of fly ash". Construction and Building Materials. October 2018. Vol. 185. p.609-616. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.085
[20] Alhassan Mohammad A, Ashur Suleiman A. "Sustainable fly ash concrete overlay mixture for preserving bridge decks". Journal of The Chinese Ceramic Society. October 2011. Vol. 39-10. p.1644-1650. DOI: https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.2011.10.006
[21] Telesca A, Marroccoli M, Calabresea D, et al. "Flue gas desulfurization gypsum and coal fly ash as basic components prefabricated building materials". Waste Management. March 2013. Vol. 33-3. p.628-633. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.022
[22] Li S, Zhang HT, Qian DX. "Research on performance of concrete made with mineral fillers and fly ash admixed desulphurization gypsum". Applied Mechanics and Materials. July 2014. Vol. 584-586. p.934-938. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.934
[23] Khatib JM, Mangat PS, Wright L. "Pore size distribution of cement pastes containing fly ash gypsum blends cured for 7 days". KSCE Journal of Civil Engineering. May 2014. Vol. 18-4. p.1091-1096. DOI: https://doi.org/10.1007/s12205-014-0136-8
[24] Prasanna Kumar Acharya, Sanjaya Kumar Patro, Narayana C, Moharana. "Effect of lime on mechanical and durability properties of blended cement based concrete". Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. June 2016. Vol. 97-2. p.71-79. DOI: https://doi.org/10.1007/s40030-016-0158-y
[25] Low WB, Guan BH, Wu ZB. "Calorimetric study of ternary binder of calcium aluminate cement, Portland limestone cement and FGD gypsum". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. July 2010. Vol. 101-1. p.119-127. DOI: https://doi.org/10.1007/s10973-009-0542-1
[26] Guo CH. "Experimental study on unconfined compressive strength of lime fly ash mixture". China Municipal Engineering. December 2010. Vol.150-6. p.11-13.
[27] Wu XH, Yao YX, Yin XW, et al. "Influence of adding lime dust on compressive strength and frost resistance of fly ash recycled concrete". Applied Mechanics and Materials. March 2013. Vol. 671-674. p.1813-1816. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.671-674.1813
[28] Feng ZR, Chen XY, Liu MY. "Quality control of dry jet mixing piles for consolidating soft soil foundations". Rock and Soil Mechanics. October 2002. Vol. 23. p.91-95. DOI: https://doi.org/10.16285/j.rsm.2002.s1.020

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the Major Universities Natural Science Research Project in Anhui Province (KJ2016SD19).

Modelo analítico para la predicción de la distorsión en componentes mecanizados



Analitical model for distortion prediction in machined components

Maria Aurrekoetxea[1], Luis-Norberto López-de-Lacalle[2], Oier Zelaieta[1] e Iñigo Llanos[1]

[1] IK4-Ideko. Calle Arriaga, 2 - 20870 Elgoibar, Guipuzkoa (España).
[2] Universidad del Pais Vasco UPV/EHU. ETSII. Plaza Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao (España).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9387 | Recibido: 11/09/2019 • Inicio Evaluación: 30/09/2019 • Aceptado: 25/11/2019

ABSTRACT

- Machining of slender components in aluminum and titanium presents major difficulties in terms of geometry and dimensional requirements. During the machining of this type of components, non-conformances due to distortions are frequent due to the residual stresses in the bulks, together with the machining induced stresses on the surfaces. Currently it is common to find numerical models based on finite element software that can estimate the final distortion of the component after machining. These calculations are key when trying to adapt the machining process to obtain components free of distortions. Despite representing a move forward, these finite element models have limitations in their industrial applicability due to the long computational times and poor usability. The present work introduces an analytical simulation model of a machining process, similar to the Layer Removal method, for the distortion prediction of machined components. This analytical modeling tool considers the initial geometry of the component, the residual stress profile of the bulk and the machining induced surface stresses. Furthermore, to validate the analytical model a comparison with finite element numerical model is presented, in terms of accuracy, computational time and usability. The results obtained reflect important benefits in favor of the analytical simulation model here presented, showing its potential as an industrial tool to use when dealing with machining distortions.
- **Keywords:** Machining Distortion, Analytical Modelling, FEM, Layer Removal, Aluminum, Titanium.

RESUMEN

El mecanizado de componentes estructurales aeronáuticos de aluminio y titanio presenta importantes dificultades para su fabricación en cuanto a exigencias geométricas y dimensionales. Durante el mecanizado de este tipo de piezas, los problemas de distorsiones son frecuentes debido principalmente a las tensiones residuales presentes en el material y a la introducción de tensiones superficiales por el propio proceso de mecanizado. Actualmente es habitual encontrar modelos numéricos basados en software de elementos finitos para enfrentarse al cálculo de la distorsión final del componente tras el mecanizado. Dichos cálculos permiten modificar el proceso de mecanizado para obtener componentes libres de distorsiones. Sin embargo, dichos modelos presentan limitaciones en cuanto a su aplicabilidad industrial debido a la complejidad de uso y a los elevados tiempos de cálculo. El presente trabajo muestra el desarrollo de un modelo analítico que simula el mecanizado capa a capa, de forma análoga al Layer Removal, para la predicción de la distorsión en componentes mecanizados a medida que se elimina material. El modelo presentado contempla la geometría inicial de la pieza en bruto, el perfil de tensiones residuales y las tensiones superficiales introducidas en el mecanizado. Tras la introducción de esta herramienta, se presenta una comparativa entre el modelo desarrollado y un modelo numérico de elementos finitos en términos de exactitud, tiempo de cálculo y utilidad. Los resultados obtenidos reflejan los importantes beneficios de la solución aquí presentada, mostrando el potencial para su uso como herramienta industrial a la hora de afrontar la problemática de las distorsiones.

Palabras clave: Distorsiones Mecanizado, Modelado Analítico, FEM, Layer Removal, aluminio, titanio.

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación de componentes estructurales de aluminio y titanio del sector aeronáutico conlleva considerables dificultades, entre las cuales destaca la aparición de distorsiones tras el mecanizado, ya que incurre en altos costes debidos a elevadas tasas de defectivo y/o retrabajo. Las causas generales de las distorsiones tras el mecanizado se pueden clasificar en: tensiones volumétricas en los brutos provenientes de procesos previos, tensiones superficiales inducidas por el propio proceso de mecanizado y deformaciones debidas a cargas mecánicas o térmicas durante el proceso. A pesar de haber sido ampliamente estudiadas [1,2], resulta complicado determinar en qué medida influye cada una de las causas, factor que dificulta la resolución de la problemática. En el caso específico de componentes estructurales del sector aeronáutico, los principales problemas de distorsiones se dan debido a las tensiones residuales presentes en los brutos antes del proceso de mecanizado, ya que llega a eliminarse hasta un 90-95% del material [2,3].

En este sentido, la pieza antes del mecanizado se encuentra en un estado de equilibrio mecánico, pero la eliminación de material durante el proceso de mecanizado rompe dicho equilibrio, y es al aliviarse las fuerzas de amarre cuando el componente se deforma libremente hasta que se logra un nuevo equilibrio mecánico [1,3,4]. Por este motivo, es crucial considerar el estado tensional de los brutos de partida a la hora de definir el proceso de mecanizado que dé lugar a niveles mínimos o en su defecto, niveles aceptables de distorsiones [5]. A pesar de ello, la variabilidad en

los estados tensionales de los brutos a mecanizar hace imposible la determinación de una única estrategia de mecanizado para distintas piezas.

Asimismo, el proceso de mecanizado y las altas cargas mecánicas y térmicas inherentes al mismo introducen nuevas tensiones residuales en la capa superficial [6]. Los parámetros de corte, la estrategia de refrigeración y la geometría de la herramienta influyen significativamente en el perfil y en la profundidad de las tensiones residuales generadas en las capas superficiales de las piezas mecanizadas [7, 8, 9, 10] no siendo fácil predecir las tensiones superficiales para unas condiciones de mecanizado dadas.

A fin de combatir esta problemática, la estrategia actual de fabricación consiste en mecanizar capa a capa con el objetivo de ajustar el proceso a medida que se va observando la aparición de distorsiones. Esta estrategia, aun resultando útil, conlleva un muy elevado número de secuencias de amarre y mecanizado, lo cual incurre en altos tiempos y costes de proceso. En este sentido, la solución pasa por caracterizar el perfil de tensiones residuales en los brutos y reemplazar las estrategias capa a capa por estrategias más productivas.

Sin embargo, no sólo las tensiones volumétricas en los brutos si no que también las tensiones inducidas por el mecanizado contribuyen a la distorsión final del componente, y no resulta sencillo determinar cuál de las causas es predominante o en qué medida influye cada una ellas. A fin de aclarar esta cuestión Yang et al. determinan por medio de simulaciones de elementos finitos que en aleaciones de aluminio la causa principal son las tensiones residuales de procesos previos, mientras que en el caso de las aleaciones de titanio tanto las tensiones de procesos previos como las inducidas por el mecanizado poseen un efecto significativo [4]. Por su parte, Sim considera también que en aleaciones de aluminio la causa predominante de las distorsiones son las tensiones volumétricas en las piezas en bruto [3].

A la hora de analizar la distorsión en componentes mecanizados en primer lugar se debe realizar una estimación de las tensiones tanto de los brutos a mecanizar como de las superficies mecanizadas. Las técnicas que se emplean actualmente para ello se pueden dividir en métodos para la determinación de las tensiones superficiales y en métodos para la determinación de las tensiones volumétricas. En cuanto a las primeras destaca la difractometría de rayos X (XRD), ya que se trata de una técnica no-destructiva pero que se limita a tensiones superficiales dada su reducida capacidad de penetración en los materiales a estudiar [2,11]. Por otro lado, entre las técnicas actuales para la determinación de las tensiones volumétricas se pueden destacar el contour method [12], el crack compliance method [13] y el método de eliminación por capas o Layer Removal method [6,14,15]. Todas ellas son destructivas y se conocen como técnicas indirectas ya que se basan en la medición de la deformación como consecuencia del reequilibrado de tensiones internas, las cuales se liberan cuando parte del material tensionado se elimina de la pieza. Generalmente requieren de costoso equipamiento de laboratorio y de personal especializado para ser llevados a cabo.

Varios autores han trabajado en la línea de modificar los métodos tradicionales de caracterización de las tensiones a fin de permitir que las empresas de fabricación puedan implementarlos, y realizar la inspección de las piezas en bruto a un bajo coste en entornos industriales. A modo de ejemplo, destaca el método In-Machine Layer Removal, que requiere únicamente de una fresadora para la eliminación de las capas y de un palpador para la medición de las deformaciones [6,14,15]. Este método consiste en la eliminación de capas finas de forma secuencial, de manera que las tensiones se van liberando gradualmente, y a través de la medición de las deformaciones debidas al reequilibrio de las tensiones internas, se calcula por teoría elástica la tensión relativa. Las ventajas de la implementación de este método en máquina son considerables, ya que se reduce el tiempo y coste asociados a inversión en equipos específicos, y se posibilita la caracterización de los perfiles de tensiones de los brutos más allá del entorno académico por personal no especializado. En contraposición, el propio proceso de mecanizado introduce tensiones en la superficie de la pieza, efecto que no se contempla a la hora de calcular las tensiones a partir de las curvaturas obtenidas en la formulación tradicional.

Por otro lado, se encuentran diversos modelos de simulación por elementos finitos capaces de predecir distorsiones debidas a tensiones residuales, los cuales muestran buena correlación con los resultados experimentales [2,6,16,17,18]. Sin embargo, este tipo de modelos conllevan altos tiempos de cálculo tal y como plantea Ma et. al [18], que realiza una comparación entre modelos de 2D y 3D reduciendo el tiempo necesario de días a horas. Este factor obstaculiza el empleo de este tipo de soluciones a la hora de definir procesos de mecanizado que minimicen las distorsiones.

El trabajo aquí presentado persigue validar un modelo de simulación capaz de predecir con precisión y agilidad el potencial de distorsión de componentes mecanizados, para posteriormente poder generar estrategias de mecanizado capaces de minimizar dichas distorsiones. El modelo que se introduce a continuación simula el proceso de Layer Removal partiendo de una pieza prismática con un perfil de tensiones volumétricas y superficiales determinado, capaz de predecir la distorsión tras el mecanizado en función de la geometría inicial de la pieza en bruto, del perfil de tensiones residuales y de las tensiones superficiales introducidas en el mecanizado. Asimismo, se realiza la validación de la herramienta desarrollada a través de un modelo de elementos finitos, y se comparan ambas en términos de precisión, agilidad, tiempo de cálculo, y complejidad de uso de cara a evaluar el potencial para su uso como una herramienta industrial a la hora de afrontar la problemática de las distorsiones. Por último, se comparan los resultados de la simulación del mecanizado por capas para el caso de dos materiales comúnmente utilizados en la fabricación de componentes estructurales aeronáuticos, como son el aluminio y el titanio, partiendo de unos perfiles de tensiones de bibliografía.

2. DESARROLLO DE MODELO ANALÍTICO PARA LA PREDICCIÓN DE DISTORSIONES

2.1.SIMULACIÓN DE LA DISTORSIÓN DEL COMPONENTE MECANIZADO: TEORÍA DE FLEXIÓN DE PLACAS

Se ha desarrollado un modelo mediante el software Matlab para el cálculo de la distorsión final en placas mecanizadas en base al estado tensional volumétrico inicial y las tensiones residuales introducidas en las superficies por el proceso de mecanizado. Por medio de la teoría de flexión de placas se determinan las curvaturas de la pieza en cada una de las dos dimensiones, asumiendo la hipótesis de que la tensión es constante a lo largo de la sección. También se presupone que la pieza en bruto es plana, es decir, que no posee curvatura inicial ($X_{0x}=0$). De esta manera el modelo presentado aborda el análisis de flexión de placas en las dos direcciones espaciales del plano X-Y, mientras que las tensiones en profundidad (Z) se consideran despreciables, siendo σ_x, σ_y, σ_z, las tensiones en cada una de las direcciones. Así, partiendo de las dimensiones originales de la pieza en bruto, espesor (*H*), longitud en dirección X e Y (*bx, by*); ésta se discretiza en *n* capas

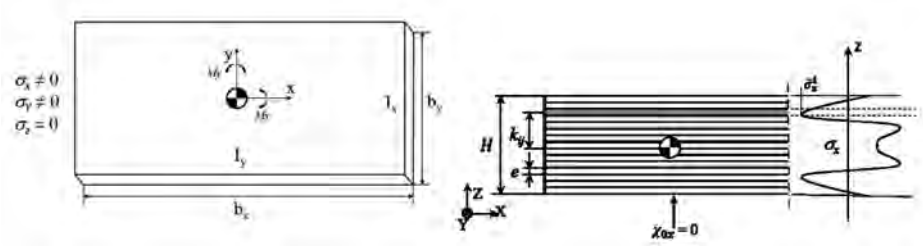


Fig. 1: Representación de la hipótesis para el modelo de simulación de Layer Removal (izda.) y discretización de la sección en n capas de espesor e para la sección transversal X, situadas a una distancia k_{ij} del plano neutro de la sección (dcha.)

horizontales de espesor (*e*), cuyo centro de gravedad se encuentra a una distancia del de toda la sección (Figura 1).

La formulación de la flexión de placas empleada se desarrolla mediante el modelo clásico que describe el comportamiento de una placa semi infinita de espesor constante [19], con módulo de elasticidad (*E*) y coeficiente de Poisson (υ). La relación entre el valor específico de curvatura de la placa (X_x, X_y) y los momentos de flexión en las direcciones X e Y (Mb_x, Mb_y) para una placa finita con una sección transversal determinada con un momento de inercia (I_x, I_y) se pueden expresar como:

$$\chi_x = \frac{Mb_x}{E \cdot I_x} - \upsilon \cdot \frac{Mb_y}{E \cdot I_y} \quad (1)$$

$$\chi_y = \frac{Mb_y}{E \cdot I_y} - \upsilon \cdot \frac{Mb_x}{E \cdot I_x} \quad (2)$$

En cuanto a los momentos flectores generados por las tensiones residuales volumétricas en la pieza en bruto (Mb_x^{RS}, Mb_y^{RS}), se pueden calcular como la suma de las contribuciones individuales de cada capa al momento flector de toda la sección (Figura 1).

$$Mb_x^{RS} = \sum(\bar{\sigma}_x^i \cdot b_{yi} \cdot e \cdot k_{ij}) \quad (3)$$

$$Mb_y^{RS} = \sum(\bar{\sigma}_y^i \cdot b_{xi} \cdot e \cdot k_{ij}) \quad (4)$$

Con respecto a las tensiones inducidas por el mecanizado, para los casos de los dos materiales estudiados, aleación de aluminio y titanio, la profundidad típica afectada es de 0,080,1 mm [8,11]. Asimismo, se asume que no variando las condiciones de corte, el perfil de tensiones inducido por el proceso de mecanizado es siempre el mismo. El efecto de las tensiones inducidas por el mecanizado en la curvatura se calcula de forma análoga, discretizando la capa superficial afectada por el mecanizado en subcapas (Figura 2).

El momento flector debido a las tensiones de mecanizado (Mb_x^{sup}, Mb_y^{sup}) se obtiene sumando el efecto de las tensiones de cada subcapa de espesor (e_s) con una tensión (σ^i_{xsup}, σ^i_{ysup}) situada a una distancia (k'_{ij}) del centro de gravedad de toda la sección, tal y como se observa en las ecuaciones (5) y (6).

$$Mb_x^{sup} = \sum_i^s \sigma^i_{x_{sup}} \cdot b_{yi} \cdot e_s \cdot k'_{ij} \quad (5)$$

$$Mb_y^{sup} = \sum_i^s \sigma^i_{y_{sup}} \cdot b_{xi} \cdot e_s \cdot k'_{ij} \quad (6)$$

De esta manera, el momento flector total de la sección (Mb_x, Mb_y) se calcula como la suma del momento de las tensiones volumétricas y el momento de las tensiones inducidas por mecanizado en la capa superficial.

$$Mb_x = Mb_x^{RS} + Mb_x^{sup} \quad (7)$$

$$Mb_y = Mb_y^{RS} + Mb_y^{sup} \quad (8)$$

Esta formulación se ha empleado para llevar a cabo la simulación de un proceso de Layer Removal. Para ello, se ha calculado la curvatura alcanzada por una placa tras la eliminación de capas sucesivas. De esta manera, para cada capa eliminada se reduce la sección de la placa y la posición de su plano neutro. Al haber eliminado material, parte de las tensiones residuales volumétricas dejan de generar momento flector según (3) y (4). En el caso de las tensiones de la superficie mecanizada, van modificando su posición siguiendo la superficie mecanizada, generando un momento flector siguiendo (5) y (6).

3. VALIDACIÓN MEDIANTE MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

A fin de verificar y validar los resultados del modelo analítico desarrollado se realiza una simulación por elementos finitos empleando el software comercial ANSYS. Para ello, se ha desarrollado un modelo capaz de simular el proceso de Layer Removal aplicado en una placa, calculando su deformación tras la eliminación de cada una de dichas capas. Al tratarse de una pieza simétrica, el modelo desarrollado corresponde a una cuarta parte de la pieza (Figura 3), la cual está discretizada en n capas de 1 mm a lo largo del espesor H. Asimismo, a excepción de la primera capa, todas las capas del sólido están divididas en m subcapas de 0,01 mm en la parte superior a fin de contemplar el perfil de tensiones inducido por el proceso de mecanizado como se observa en el detalle de la Figura 3 (izda.). Por tanto, el número total de capas del modelo de elementos finitos es $N = n + (n - 1) \cdot m$. En cuanto a las condiciones de contorno, para representar el hecho de que el modelo constituye únicamente una cuarta parte de la pieza se ha restringido el desplazamiento de los nodos en X=0, e Y=0. Por otra parte, el desplazamiento del nodo en el origen de coordenadas se ha restringido en las tres direcciones para representar la condición de apoyo tal y como se observa en la Figura 3 (dcha.). De esta manera, el movimiento del sólido simulado está restringido, pero la pieza tiene posibilidad de deformarse hasta llegar a un nuevo estado de equilibrio.

El tipo de elemento seleccionado para realizar la simulación por elementos finitos es un elemento sólido tridimensional (SOLID186) de 20 nodos con tres grados de libertad por nodo: traslaciones en las direcciones nodales X, Y, Z. El tamaño de elemento empleado es 20 mm. El modelo simula el método Layer Removal, eliminando el material de cada capa mediante las capacidades de *Element Birth and Death* de ANSYS. El número de steps del cálculo

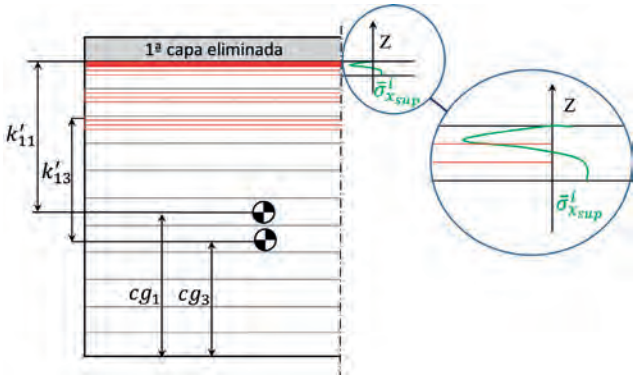


Fig. 2: Representación esquemática de las subcapas y las distancias de estas al plano neutro, junto con el perfil de tensiones en la superficie mecanizada

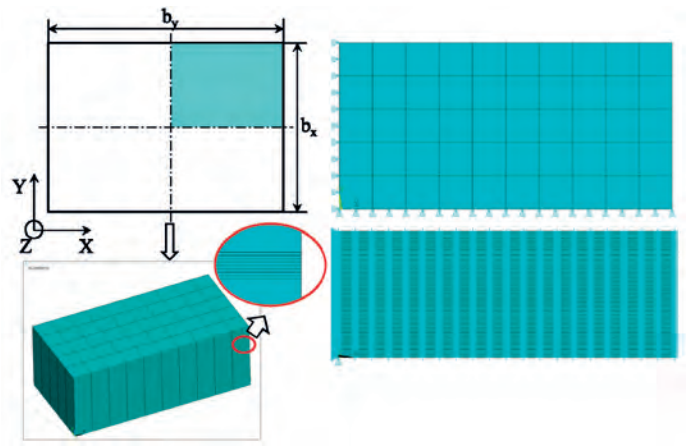


Fig. 3: Representación del modelo de elementos finitos de un cuarto de placa y detalle de las subcapas (izda.); y vistas de alzado y planta del modelo incluyendo las condiciones de contorno (dcha.)

se corresponde con el número de capas, de forma que por cada step se llegan a eliminar elementos de $n + m$ volúmenes.

Con intención de posibilitar una comparación cuantitativa entre los resultados de Matlab y ANSYS, se evalúan los valores de curvatura alcanzados por el modelo de ANSYS tras la eliminación de cada una de las capas, tal y como se lleva a cabo en el modelo analítico expuesto en la sección 3. Estos valores de curvatura se obtienen a partir de las deformadas como resultado de la eliminación de cada capa, realizando una regresión de la deformación de la superficie inferior del modelo a una superficie de segundo grado (9) mediante mínimos cuadrados [14]. De esta manera, los valores obtenidos por las ecuaciones (10, 11) se corresponderían con los valores de curvatura alcanzados por el modelo de ANSYS en las direcciones X e Y respectivamente, representando *A, B, C, D, E, F* las constantes de la ecuación que define la superficie de segundo grado, y (las curvaturas en las direcciones X e Y.

$$z(x,y) = A \cdot x^2 + B \cdot y^2 + C \cdot x \cdot y + D \cdot x + E \cdot y + F \quad (9)$$

$$\chi_x = 2 \cdot A \quad (10)$$

$$\chi_y = 2 \cdot B \quad (11)$$

La Figura 4 (izda.) muestra el desplazamiento nodal obtenido con el modelo de ANSYS para una secuencia de eliminación de capas dada. Los valores de desplazamiento en Z de los nodos en la superficie inferior de dicho modelo han sido obtenidos y tratados para obtener los coeficientes correspondientes a la ecuación (9), así como las curvaturas en las ecuaciones (10) y (11). La Figura 4 (dcha.) muestra una representación en la que pueden observarse tanto los nodos como la superficie de regresión obtenida mediante la ecuación (9), pudiendo observarse el buen acuerdo que alcanza dicha superficie con los nodos.

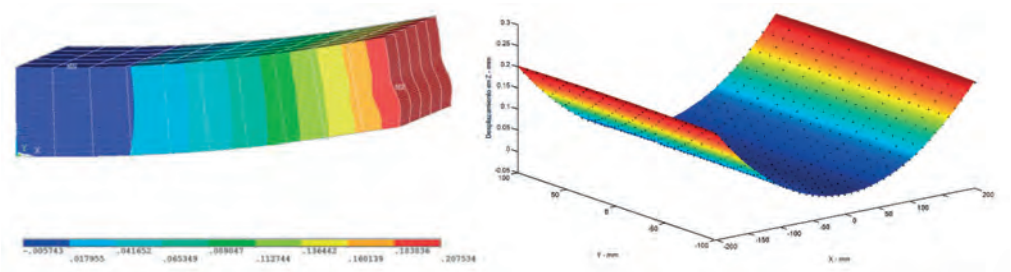


Fig. 4: Simulación FEM del desplazamiento en Z cuando se han mecanizado 20 capas: vista de un cuarto de placa en ANSYS (izda.), y vista de la placa completa por simetría y regresión cuadrática del desplazamiento de los nodos en Matlab (dcha.)

Parámetro	Al7050-T7451	Ti6Al4V
Módulo de Young - E (GPa)	71,7	118
Coeficiente de Poisson - υ(-)	0,33	0,342

Tabla I: Propiedades mecánicas del Al7050-T7451 y del Ti6Al4V

4. RESULTADOS

A la hora de realizar la comparación del comportamiento de los modelos de ANSYS y Matlab expuestos en el anterior apartado, se han realizado varias simulaciones del proceso de Layer Removal para dos materiales empleados en componentes estructurales aeronáuticos susceptibles de experimentar distorsiones, Al7050-T7451 y Ti6Al4V. Para ambos materiales, se ha analizado tanto el efecto de las tensiones residuales volumétricas presentes en los tochos a mecanizar, como las tensiones residuales generadas en las superficies mecanizadas.

Los datos empleados en estos cálculos han sido tomados de bibliografía. La Tabla 1 muestra los valores empleados para las constantes elásticas para ambos materiales. Tanto en el caso de las tensiones residuales volumétricas como en el de las superficiales, la Figura 5 muestra los diferentes valores empleados, así como las fuentes de las que han sido obtenidas.

Se debe remarcar que las tensiones en los brutos dependen principalmente de las distintas fases del proceso de fabricación, llegándose a observar diferencias de más de un orden de magnitud para el mismo material sujeto a distintos tratamientos, como, por ejemplo, en el caso del Ti6Al4V entre las variedades As-Rolled y Annealed. Asimismo, la variabilidad en las tensiones residuales volumétricas presentes en los tochos a mecanizar implica que los métodos de caracterización de tensiones como el Layer Removal sean imprescindibles a la hora de realizar estimaciones de distorsiones mediante modelos de simulación como el aquí presentado.

Estos datos de entrada se han empleado para realizar diferentes simulaciones de ensayos de Layer Removal para diferentes casos. Para ambos materiales, se han realizado cálculos para:

- Modelo únicamente con tensiones volumétricas
- Modelo únicamente con tensiones superficiales
- Modelo con tensiones volumétricas y superficiales

Para cada uno de estos casos, se ha realizado la simulación de la eliminación de capas de 1 mm, partiendo de una placa rectangular con un tamaño de 400x200 mm y un espesor de 75 mm. Tras la eliminación de cada una de las capas de 1 mm, se han obtenido los valores de las curvaturas en las direcciones X e Y de la placa.

En el caso de los cálculos realizados para la aleación de aluminio, la Figura 6 muestran la evolución de las curvaturas en función de las capas mecanizadas para los diferentes cálculos realizados. Como puede observarse, los valores de las curvaturas en la dirección X son superiores para el caso del modelo que únicamente tiene en cuenta las tensiones volumétricas, mientras que el modelo únicamente con las tensiones en superficie obtiene mayores curvaturas para la dirección Y. En los resultados de los cálculos con las tensiones volumétricas y de superficie, se observa que el efecto de las tensiones superficiales es prácticamente despreciable en comparación al efecto de

las tensiones volumétricas para las primeras capas, mientras que su efecto comienza a ser significativo a partir de las capas 60-65 e incluso predominante al final del cálculo.

Los resultados de curvaturas obtenidos para los cálculos realizados para el titanio se muestran en la Figura 7. Al igual que en el caso de la aleación de aluminio, se obtienen mayores curvaturas en la dirección X al tener en cuenta únicamente las tensiones volumétricas del material. Cabe destacar el hecho de que los valores de curvatura obtenidos para la aleación de titanio son un orden de magnitud superior a los obtenidos en los cálculos de aluminio. En el caso del efecto de las tensiones superficiales, ambas direcciones espaciales muestran un comportamiento muy similar durante los cálculos para el titanio. Para este caso, los valores de curvatura obtenidos resultan muy similares a los obtenidos para la aleación de aluminio, resultando incluso inferiores en el caso de la aleación de titanio. Así, al tener en cuenta ambos estados tensionales (tensiones volumétricas y superficiales) en los cálculos, los resultados resultan prácticamente idénticos a los obtenidos al tener en cuenta únicamente las tensiones volumétricas, a excepción de las últimas capas mecanizadas donde se puede observar una ligera desviación.

En lo que respecta a la comparación del comportamiento de los modelos de Matlab y ANSYS, se observa que, para ambos materiales y los diferentes casos analizados, los resultados obtenidos con ambos modelos muestran un buen acuerdo. A medida que los cálculos avanzan por encima de la capa 50, es posible identificar cómo los resultados de ambos modelos se desvían ligeramente de manera progresiva. A pesar de ello, los resultados obtenidos con el modelo desarrollado en Matlab son prácticamente idénticos a los obtenidos mediante el modelo de ANSYS. En lo que respecta a los tiempos de cálculo, la Tabla 2 muestra una comparación entre los datos obtenidos para ambos modelos. Como puede observarse, los cálculos realizados mediante el modelo de Matlab resultan en tiempos cercanos a 0,5 segundos para realizar la simulación de la eliminación de 72 capas, mientras que el modelo de ANSYS requiere de tiempos cercanos a una hora. Dicho punto, junto con las mínimas diferencias entre los resultados de ambos modelos, muestra la capacidad del modelo de Matlab desarrollado para ser empleado como herramienta para la predicción de las distorsiones en componentes mecanizados una vez conocidos el per-

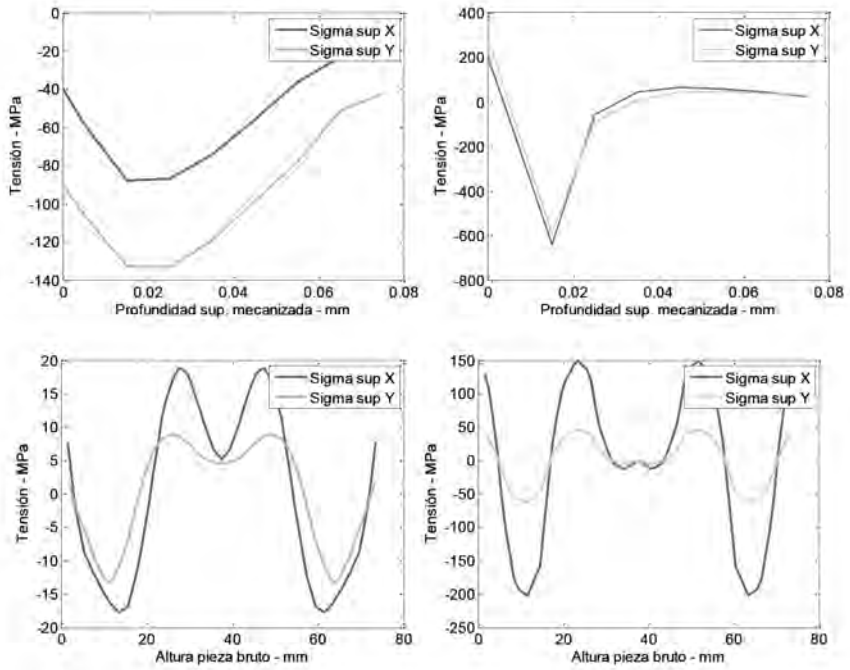


Fig. 5: Perfil de tensiones inducidas por el mecanizado (arriba): aluminio (izda.) [7], titanio (dcha.) [20]; y tensiones residuales de la pieza en bruto (abajo): aluminio (izda.) [13], titanio (dcha) [11]

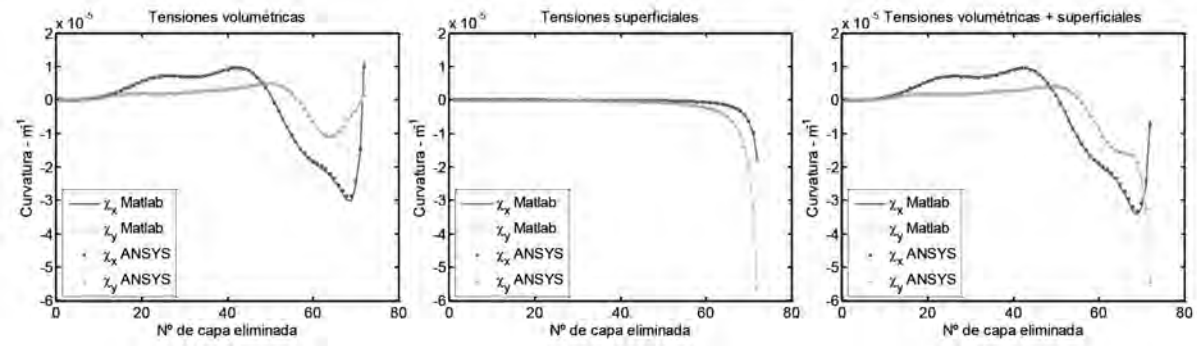


Fig. 6: Evolución de las curvaturas en X e Y para el aluminio en función de las capas mecanizadas considerando: sólo tensiones volumétricas del bruto (izda.), sólo tensiones inducidas por mecanizado(centro), y ambas (dcha.)

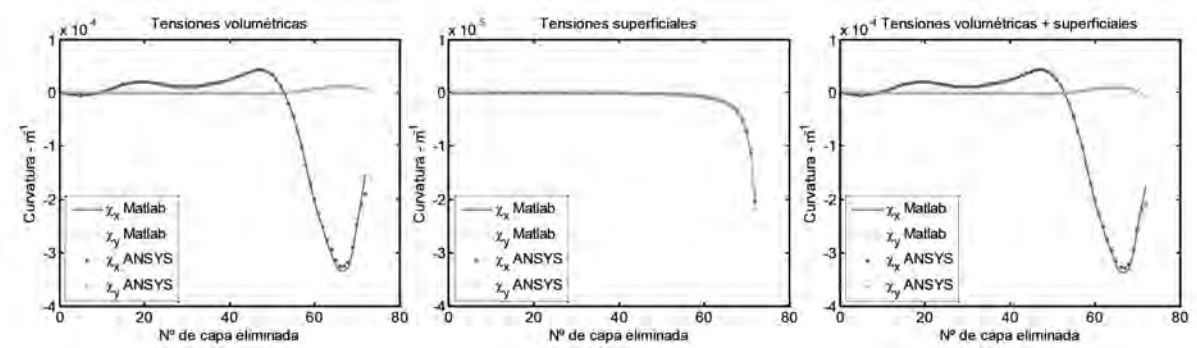


Fig. 7: Evolución de las curvaturas en X e Y para el titanio en función de las capas mecanizadas considerando: sólo tensiones volumétricas del bruto (izda.), sólo tensiones inducidas por mecanizado(centro), y ambas (dcha.)

Modelo	Material	Caso tensional	Tiempo de cálculo (s)
ANSYS	Al7050-T7451	Volumétricas	3540,00
		Superficiales	3420,00
		Volu+Sup	3660,00
	Ti6Al4V	Volumétricas	4200,00
		Superficiales	3420,00
		Volu+Sup	5040,00
Matlab	Al7050-T7451	Volumétricas	0,50
		Superficiales	0,49
		Volu+Sup	0,47
	Ti6Al4V	Volumétricas	0,54
		Superficiales	0,54
		Volu+Sup	0,46

Tabla II: Tiempos de cálculo de los modelos analíticos (Matlab) y de elementos finitos (ANSYS) para cada uno de los casos tensionales

fil de tensiones volumétrico y superficial. Al mismo tiempo, el modelo desarrollado constituyendo la formulación del método Layer Removal presenta un gran potencial a la hora de caracterizar las tensiones residuales actuales de los tochos a mecanizar.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta un modelo de simulación para la predicción de las distorsiones en el mecanizado de componentes esbeltos de aluminio y titanio del sector aeronáutico. Del análisis de los resultados pueden extraerse las siguientes conclusiones generales en cuanto al modelo de simulación:

· El modelo analítico presentado obtiene resultados prácticamente idénticos al modelo de ANSYS, tanto en el caso del aluminio como en el caso del titanio, quedando así satisfactoriamente validado.

· El tiempo de cálculo requerido por el modelo analítico resulta despreciable. Este dato resulta más significativo en comparación al tiempo necesario para alcanzar el resultado final con el modelo de ANSYS, mostrando un mayor potencial en cuanto a implementación y facilidad de uso.

· El modelo presentado se puede utilizar de forma ágil para predecir la geometría final de las piezas a mecanizar, y también presenta potencial a la hora de caracterizar las tensiones reales de los brutos empleando la formulación presentada de forma inversa.

La principal ventaja del reducido tiempo de computación requerido por la solución propuesta es que permite caracterizar las tensiones residuales de cada bruto, las cuales son variables entre brutos, de forma inmediata sin necesidad de detener la producción. De esta forma se posibilitan también la integración de dicha solución en la planificación de proceso y selección de parámetros en-línea, para a continuación predecir las distorsiones potenciales a ritmo de producción industrial.

Por otra parte, analizando los resultados para los casos específicos del aluminio y el titanio y tomando unas tensiones de bibliografía se puede concluir:

· El efecto de las tensiones inducidas por el mecanizado en la curvatura es prácticamente despreciable en comparación al efecto de las tensiones volumétricas para las primeras capas, mientras que su efecto comienza a ser significativo en las últimas capas, es decir, cuando la sección transversal posee baja rigidez con respecto a las cargas introducidas en la capa superficial.

· No se puede generalizar para un material determinado que uno de los factores sea predominante frente al otro. La determinación del factor predominante en las distorsiones finales recae en el conocimiento de los perfiles de tensiones volumétrico, superficial y geometría real de pieza.

· Las curvaturas son de mayor magnitud en el caso del titanio, hecho que se debe principalmente a que las tensiones volumétricas son considerablemente mayores en proporción al resto de tensiones introducidas en los modelos de simulación. Asimismo, el efecto de las tensiones inducidas por el mecanizado es mayor en el caso del aluminio por la misma razón, siendo del mismo rango de magnitud tanto las volumétricas como las superficiales. Por consiguiente, estos resultados no son extrapolables dada la variabilidad de los perfiles de tensiones, tanto volumétricos como superficiales.

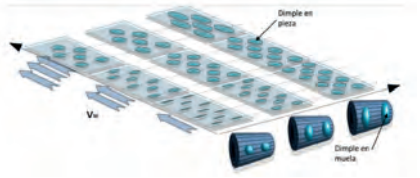
REFERENCIAS

[1] Brinksmeier E., Sölter J. "Prediction of shape deviations in machining. " CIRP Annals – Manufacturing Technology Vol. 58, 2009, pp. 507-510. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.123
[2] Jawahir I.S., Brinksmeier E., M'Saoubi M., Aspinwall D.K., Outeiro J.C., Meyer D., Umbrello D., Jayal A.D. "Surface integrity in material removal processes: Recent advances. " CIRP Annals – Manufacturing Technology Vol. 60, 2011, pp. 603-626. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002
[3] Sim W. "Challenges of residual stresses and part distortion in the civil airframe industry." International Journal of Microstructure and Material Properties, Vol. 5, n. 4-5, 2010, pp.446-455. https://doi.org/10.1504/IJMMP.2010.037621
[4] Yang Y., Li M., Li K.R., "Comparison and analysis of main effect elements of machining distortion for aluminum alloy and titanium alloy aircraft monolithic component. " International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 70, 2014, pp. 1803–1811. https://doi.org/10.1007/s00170-013-5431-x
[5] Chantzis D., Van-der-Veen S., Zettler J., Sim W.M. "An industrial workflow to minimise part distortion for machining of large monolithic components in aerospace industry." Proceedings of the 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, Procedia CIRP Vol. 8, 2013, pp. 281- 286. https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.103
[6] Dreier S, Denkena B. "Determination of Residual Stresses in Plate Material by Layer Removal with Machine-integrated Measurement." Proceedings of the 5th MIC 2014 – New Production Technologies in Aerospace Industry - 5th Machining Innovations Conference, Procedia CIRP Vol. 24, 2014, pp. 103-107. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.137
[7] Madariaga A., Perez I., Arrazola P.J., Sanchez R., Ruiz J.J., Rubio F.J. "Reduction of distortions in large aluminium parts by controlling machining-induced residual stresses. " The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 97, 2018, p. 967–978. https://doi.org/10.1007/s00170-018-1965-2
[8] Köhler J., Grove T., Maiß O., Denkena B. "Residual Stresses in Milled Titanium Parts." Procedia CIRP 2, 2012, pp. 79–82. https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.05.044
[9] Grove T., Köhler J., Denkena B. "Residual Stresses in Milled β-Annealed Ti6Al4V. " Procedia CIRP 13, 2014, pp. 320–326. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.054
[10] Denkena B., Reichstein M., Garcia L. de L. "Milling Induced Residual Stresses in Structural Parts out of Forged Aluminum Alloys" International Journal of Machining and Machinability of Materials, 4, 2008, No. 4. https://doi.org/10.1504/IJMMM.2008.023717
[11] Rae W., Rahimi S. "Evolution of Microstructure and Residual Stress in Hot Rolled Ti-6Al-4V Plates Subjected to Different Heat Treatment Conditions." Residual Stresses 7. Materials Research Proceedings 6, 2018, 171-176 http://dx.doi.org/10.21741/9781945291890-27
[12] Zhang Z., Li L., Yang Y., He N., Zhao W. "Machining distortion minimization for the manufacturing of aeronautical structure. " International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 73, 2014, pp. 1765– 1773. https://doi.org/10.1007/s00170-014-5994-1
[13] Prime M. B., Hill M. R. "Residual stress, stress relief, and inhomogeneity in aluminum plate." Scripta Materiala Vol. 46, 2002, pp. 77-82. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01201-5
[14] Gulpak M., Sölter J., Brinksmeier, E. "Prediction of shape deviations in face milling of steel." Proceedings of the 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, Procedia CIRP, Vol. 8, 2013, pp. 15–20. https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.058
[15] Llanos I., Lanzagorta J. L., Beristain, A. "Part Distortion Modeling on Aluminum Slender Structural Components for Aeronautical Industry." Proceedings of the 16th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, Procedia CIRP Vol. 58, 2017, pp. 158–162. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.213
[16] Cerutti X., Mocellin K. "Parallel finite element tool to predict distortion induced by initial residual stresses during machining of aeronautical parts." International Journal of Material Forming 8, 2015, pp. 255–268. https://doi.org/10.1007/s12289-014-1164-0
[17] Dreier S., Brüning J., Denkena B. "Simulation based reduction of residual stress related part distortion: Simulationsbasierte Reduzierung eigenspannungsbedingten Bauteilverzugs." Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 47, 2016, 710–717. https://doi.org/10.1002/mawe.201600604
[18] Ma K., Goetz R., Srivatsa S.K. "Modeling of Residual Stress and Machining Distortion in Aerospace Components" (PREPRINT, 2010): Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA. https://doi.org/10.21236/ADA523921
[19] Timoshenko S.P., Woinkowsky-Krieger S. "Theory of Plates and Shells", 1959, McGraw-Hill Book Company.
[20] Yang D., Liu Z., Ren X, Zhuang P. "Hybrid modeling with finite element and statistical methods for residual stress prediction in peripheral milling of titanium alloy Ti-6Al-4V." International Journal of Mechanical Sciences 108–109, 2016, 29–38. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.01.027

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la ayuda de Grupos de excelencia del Gobierno vasco IT IT1337-19 y al proyecto Elkartek PROCODA

Texturizado por rectificado para la mejora de propiedades de fricción en componentes industriales



Texturing by grinding for the improvement of friction properties in industrial components

Maria Garcia Moreno[1], Jorge Álvarez Ruiz[1], David Barrenetxea Azpeitia[1] y Leire Godino Fernández[2]

[1] IK4-Ideko. Calle Arriaga, 2 - 20870 Elgoibar, Gipuzkoa (España).
[2] Universidad del Pais Vasco UPV/EHU. Escuela de Ingeniería. Plaza Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao (España).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9385 | Recibido: 11/09/2019 • Inicio Evaluación: 30/09/2019 • Aceptado: 16/12/2019

ABSTRACT

• The economic and environmental cost of friction in machinery and transport is significantly remarkable being the machine tool one of the most affected. In this sector, the movements are totally affected by the friction originated in the displacements between the guideways and the carriages, which results in terms of precision, energy consumption and component wear. In this line, texturing has proved to be a useful tool to reduce friction. Texturing techniques include frosting and scraping, both manual and costly processes in which the final finish of the workpiece depends on the operator. Other techniques such as laser texturing represent an effective and precise procedure which is at the same time expensive and not applicable in large workpieces. One of the main challenges is to develop techniques capable of producing these textures in a repetitive and economically viable way. In this work, a new assisted dressing technique that allows generating different textures by grinding, controlling the geometry and distribution of these, is presented. This technique allows to create textures in large workpieces, such as the guides of the machine tools and to do it in a repetitive way and in the same machine in which the guide has been ground previously, which entails a reduction in time and costs. This technique has been validated through tribological tests obtaining lower friction coefficients than with manual techniques.

• **Keywords:** Friction, grinding, texturing, dimples, machine-tool, guideways.

RESUMEN

El coste económico y medioambiental que supone la fricción en maquinaria y transportes es significativamente llamativo, siendo la máquina-herramienta una de las más afectadas. En este sector, los movimientos están totalmente afectados por la fricción originada en los desplazamientos entre las guías y carros, lo cual se traduce en términos de precisión, consumo energético y desgaste de componentes. En esta línea, el texturizado ha demostrado ser una herramienta útil para la reducción de la fricción. Entre las técnicas de texturizado se encuentran el floreteado y el rasqueteado, ambos procesos manuales y costosos en los que el acabado final de la pieza depende del operario. Otras técnicas como el texturizado por láser suponen un procedimiento eficaz y preciso a la par que costoso y no aplicable en piezas grandes. Uno de los principales retos consiste en desarrollar técnicas capaces de producir estas texturas de una manera repetitiva y económicamente viable. En este trabajo se presenta una nueva técnica de diamantado asistido que permite generar diferentes texturas mediante el rectificado, controlando la geometría y distribución de éstas. Esta técnica permite crear texturas en piezas grandes, como pueden ser las guías de las máquinas-herramienta y hacerlo además de forma repetitiva y en la misma máquina en la que se ha rectificado la guía previamente, lo que supone una reducción en tiempos y costes. Esta técnica se ha validado mediante pruebas tribológicas obteniendo coeficientes de fricción más reducidos que con las técnicas manuales.

Palabras clave: Fricción, rectificado, texturizado, *dimples*, guías, máquina herramienta.

1. INTRODUCCIÓN

La fricción es la fuerza de resistencia al deslizamiento relativo de un sólido sobre otro. La fricción está siempre presente, aunque se coloque un lubricante entre las superficies para reducirla. Hoy en día, la fricción es una de las mayores preocupaciones en la fabricación e industrias como la automotriz y los bienes de equipo, están invirtiendo fuertemente en la investigación sobre cómo reducir de la fricción y el desgaste en los sistemas mecánicos [1-5]. Los resultados de estudios realizados en torno a la tribología de equipos para el transporte, la generación de energía y la maquinaria industrial indican la posibilidad de ahorrar una décima parte del consumo total de energía a través de mejores prácticas tribológicas, lo cual podría suponer un ahorro energético de miles de millones de euros únicamente en Europa.

La máquina herramienta es uno de los sectores más afectados por la fricción. En este sector, los movimientos están totalmente afectados por la fricción originada en los desplazamientos entre las guías y carros, lo cual se traduce en términos de precisión, consumo energético y desgaste de componentes.

Entre los métodos de fabricación destinados a la reducción de la fricción, se encuentran el floreteado y el rasqueteado. Si bien el objetivo principal del rasqueteado es asegurar el buen contacto entre dos superficies, mediante el floreteado lo que se pretende es conseguir unas depresiones sobre la superficie de deslizamiento para que el lubricante se deposite y así asegurar la presencia de lubricante en la zona de contacto en todo momento, disminuyendo el rozamiento durante el movimiento relativo (Fig. 1a). Es un método de acabado superficial que se realiza por extracción de virutas finas mediante una herramienta metálica con una punta de carburo y que ha de llevarse a cabo sobre superficies que ha-

yan sido ya mecanizadas previamente (Fig. 1b). Como resultado, la fricción se mantiene en valores bajos, se evitan problemas de deslizamiento como el *stick-slip* y la vida útil de las superficies de las guías de deslizamiento se prolonga. Sin embargo, el floreteado es un trabajo laborioso para el operario, incluso utilizando herramientas eléctricas. Además, siendo una operación manual, es un proceso incontrolado, poco rentable y que requiere mucho tiempo. Adía de hoy el floreteado tiene definidos unos escasos parámetros de validación orientativos en cuanto a forma de la huella, orientación de esta y porcentaje de huella sobre la superficie total, pero no se llega a realizar ninguna medición cualitativa de la geometría de la superficie lograda ni de su capacidad tribológica.

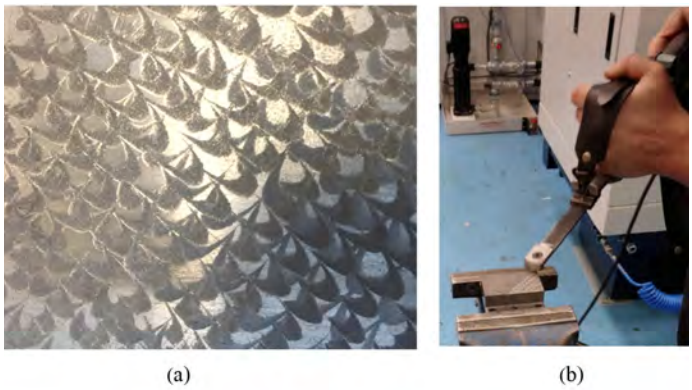


Fig. 1: (a) Superficie de hierro fundido floreteada, (b) operación manual de floreteado

Para evitar los inconvenientes del floreteado, surge la alternativa de implementar diferentes texturas en las superficies de las guías para mejorar su comportamiento de fricción. Se han realizado importantes trabajos de investigación en texturización de superficies con este objetivo. En 2009 y 2010, L. Galda et al. [6-7] estudian la influencia de diferentes formas y disposiciones de las bolsas de aceite en la fricción y sus efectos en la resistencia al desgaste de los rodamientos de acero. Las texturas se fabricaron mediante bruñido y las pruebas tribológicas realizadas mostraron una mejora en el comportamiento de resistencia al desgaste en superficies texturizadas y, además, la forma demostró ser el factor principal en esta mejora. M. Nakako et al. [8] utilizaron un láser para la micro-texturización, generando hoyuelos de 4-6 µm de profundidad y 58-80 µm de diámetro en superficies de acero endurecido. En este caso las pruebas de tribología *pin-on-disc* demostraron ampliar el rango del régimen de lubricación hidrodinámica en términos de carga y velocidad de deslizamiento, así como la reducción del coeficiente de fricción, concluyendo que una menor densidad de hoyuelos era más beneficiosa para la lubricación. El texturizado por láser supone un procedimiento eficaz y preciso a la par que costoso y no aplicable en piezas grandes. En el trabajo desarrollado por M. Nakako et al. [9] se comparó la micro-texturización mediante granallado en superficies de hierro fundido de 6-10 µm de profundidad y 60 µm de diámetro, con ranuras fresadas de 40-50 µm de profundidad y 500 µm de diámetro y superficies planas. Los patrones ranurados suprimieron la generación de presión hidrodinámica que resultó en una mayor fricción. El micro-patrón de hoyuelos incrementó la capacidad de carga de la película lubricante, lo que lleva a una menor fricción.

Por tanto, es necesario implementar en la industria un proceso que permita texturizar superficies sin aumentar significativamente los costes ni los tiempos de ciclo. Surge así la opción del texturizado por rectificado. El rectificado es una técnica rentable, fácilmente controlable mediante los parámetros de proceso. Otro punto a favor es que mediante el rectificado el texturizado puede aplicarse a cualquier tipo de superficie independientemente del material, desde longitudes pequeñas de 10-20 mm hasta las más largas de 12-18 metros. En el caso de las guías de fabricación industrial, el texturizado por rectificado presenta además la importante ventaja de que el rectificado ya forma parte de los procesos de fabricación de las guías, por lo que no es necesario realizar inversiones adicionales y los costes de operación no se incrementarían significativamente.

La evolución histórica de las técnicas de texturizado por rectificado es la siguiente. El texturizado por rectificado se introdujo por investigadores del CIRP [10], con un método basado en rectificar con muelas con patrones helicoidales creados con un diamantador monopunta utilizado parámetros de rectificado especiales, y que fue aplicado a rodamientos cerámicos. Los resultados de la investigación en el modelizado del proceso, la simulación y los experimentos se mostraron en publicaciones posteriores [11-15]. En 2009 Denkena et al. [16] proponen una nueva estrategia para obtener micro perfiles en la superficie de la muela. En este caso, el diamantado se realiza con diamantadores de disco perfilados. La técnica se aplicó para implementar micro-ranuras en los álabes de compresores para reducir la fricción en el flujo turbulento. En la continuación del estudio [17] se encuentran reducciones de hasta el 4% en la fricción. Oliveira et al. presentan otra técnica que texturiza la superficie de la muela mediante la modificación continua de la profundidad de pasada de diamantado [18-19]. Esta modificación se obtiene conectando el diamantador a un dispositivo. El rango de texturas que se puede lograr aumenta como se muestra en diferentes casos de estudio.

En este documento, se presenta una solución industrial para reducir la fricción en las superficies de las guías de hierro fundido. Esta reducción de la fricción se logra mediante un método de texturizado por rectificado. El texturizado debe implementarse en la superficie de la muela mediante una operación de diamantado realizada por un nuevo dispositivo de diamantado asistido. El dispositivo de texturizado desarrollado a partir del concepto presentado por Oliveira en [18], así como el procedimiento utilizado para texturizar y las ventajas y desventajas de los diferentes patrones de texturas evaluados mediante pruebas tribológicas se recogen en el presente documento. Finalmente, se muestran las conclusiones de la investigación, así como el trabajo a realizar a futuro.

2. DESARROLLO

2.1. DIAMANTADO ASISTIDO

El dispositivo es un sistema de diamantado asistido por vibraciones, desarrollado con el objetivo de disponer de una tecnología para generar patrones definidos en la superficie de la muela rectificadora mediante el proceso de diamantado.

La metodología de aplicación de esta tecnología se basa en la generación de señales desde un dispositivo que se manda al actuador piezoeléctrico, el cual actúa sobre el diamantador, confiriéndole un movimiento controlado de penetración durante el proceso de diamantado. Mediante el correcto ajuste de la velocidad de avance de diamantado, la velocidad de giro de muela y las señales de entrada, se pueden generar diferentes tipos de patrones sobre la superficie de la muela. Estos patrones se copiarán posteriormente en la pieza rectificada, generando superficies funcionales en función de los patrones generados en la muela y los parámetros de rectificado empleados.

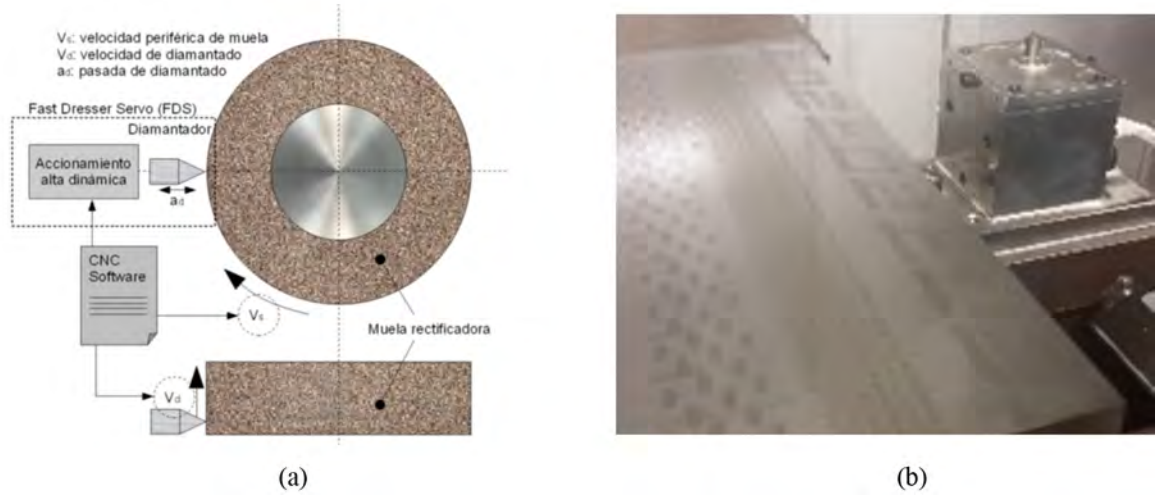


Fig. 2: Dispositivo de diamantado asistido (a) esquema de funcionamiento, (b) dispositivo en máquina

El dispositivo consiste en un sistema compuesto por los elementos que se muestran en la Fig. 2:

- Un actuador piezoeléctrico colocado en el diamantador monopunta.
- Un utillaje para unir el actuador al diamantador.
- Un dispositivo para generar las señales de entrada al actuador.
- Un software para definir el tipo de señal en función de las condiciones de diamantado y la superficie que se quiere conseguir.

Partiendo de este concepto presentado por Oliveira et al. [18] se ha desarrollado el diseño del utillaje donde montar el actuador piezoeléctrico y el diamantador. Para ello se han realizado cálculos de dinámicos y de rigidez. El utillaje diseñado tiene unas dimensiones generales de 92 x 94 x 84 mm y se ha fabricado en aluminio ya que este tiene un mejor comportamiento a fatiga que el acero.

En el diseño del utillaje se ha tenido en cuenta la necesidad de alojar todo el cableado y la refrigeración del interior del dispositivo que se realiza con aire comprimido. Otro aspecto que se ha cuidado en el diseño es la estanqueidad del dispositivo ya que durante el proceso de diamantado y rectificado se trabaja con taladrina. Por ello, se ha cuidado que ninguna de las aristas comunique directamente con el exterior y que la parte móvil pueda albergar dos juntas tóricas. Además, el aire comprimido que se utiliza para la refrigeración del dispositivo genera una presión positiva interna que dificulta la entrada del refrigerante. La validación del diseño del utillaje mediante un análisis FEM.

2.2. ANÁLISIS TEÓRICO

Existe una infinidad de posibilidades a la hora de crear una textura. La forma, el tamaño y la profundidad de los hoyuelos o *dimples*, la distribución de estos y la densidad de textura frente a la superficie total son los diferentes parámetros a definir.

Teniendo en cuenta los trabajos realizados previamente por Galda et al. sobre la influencia de la forma de las bolsas de aceite [6-7] en los que los mejores resultados de fricción se obtienen con texturas de forma esféricas, se ha optado por utilizar este tipo de formas, lo cual se consigue generando texturas cilíndricas en la muela. Con el objetivo de que este coeficiente de fricción se mantenga constante, la textura generada en la superficie de la guía tiene una distribución que garantiza que durante todo el recorrido siempre hay la misma proporción de textura frente superficie total en contacto con el carro. Además, se ha definido un solapamiento transversal entre *dimples* para garantizar que el carro se encontrará siempre con una capa de lubricante alojada dentro del *dimple* que pueda arrastrar a la zona sin textura, crear una capa de lubricante entre las superficies y reducir la fricción entre la guía y el carro.

El ancho de *dimple* generado en la superficie texturizada es igual al ancho de *dimple* generado en la muela mediante el diamantado asistido. Esto se debe a que los *dimples* de forma cilíndrica de la muela tienen un diámetro constante en toda su altura. La anchura mínima del *dimple* que se puede generar en la muela y, por lo tanto, en la superficie texturizada está limitada por la velocidad de respuesta del actuador piezoeléctrico y de la velocidad transversal de diamantado. El ancho máximo estará limitado por el ancho de la muela y el número de *dimples* que se quieran generar en ese ancho.

El largo del *dimple* que se obtiene como resultado en la guía (l_{dimp}) depende de diferentes factores: la longitud de contacto, la longitud del *dimple* creado en la muela mediante el diamantado asistido (P_{dimp}) y la velocidad de avance de rectificado (v_w). Si se discretiza el perímetro de la muela en puntos (p_{vuelta}), la longitud del *dimple* generado en la superficie de la guía se puede calcular de la siguiente manera:

$$l_{dimp} = 2 \cdot \sqrt{d_s \cdot a_e} + \frac{p_{dimp}}{p_{vuelta}} \cdot v_w \qquad (2.1)$$

La longitud de contacto es la trayectoria que describe cada punto de la periferia de la muela sobre la guía y que para un mismo diámetro de muela (d_s), varía en función de la profundidad de pasada de rectificado (a_e). Cuanto mayor sea la profundidad de pasada de rectificado, mayor será la longitud del *dimple* que se

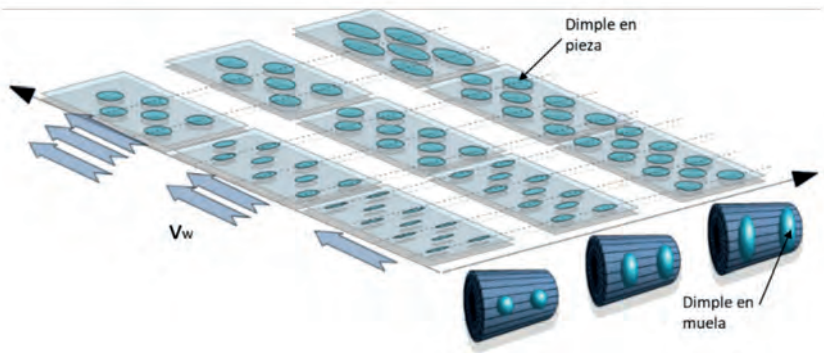


Fig. 3: Influencia de la velocidad de avance y tamaño de dimple de muela

crea en la guía. Además, la profundidad de pasada de rectificado define la profundidad del *dimple* generado en la guía. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en este caso dicha profundidad está limitada por la altura del *dimple* que se haya creado en la muela con el diamantado, que corresponde a a_d. Si la profundidad de pasada de rectificado es igual o mayor a la altura de *dimple* en la muela, al rectificar la guía para crear la textura la parte lisa de la muela también estará rectificando y por lo tanto la profundidad de *dimple* que se obtiene en la guía será igual a la altura de *dimple* de la muela. De la misma manera, la longitud de *dimple* que depende de la longitud de contacto estará también limitada de esta forma.

En cuanto a la longitud del *dimple* creado en la muela, esta depende de la señal que se le comande al diamantado asistido, en la cual se define el tiempo durante el cual el diamantador se tiene que retirar (tiene que penetrar menos en la muela) para crear la textura.

Finalmente, una velocidad de avance de rectificado mayor o menor hace que los surcos generados se alarguen o acorten respectivamente. Además, también define la distancia longitudinal entre las texturas creadas por el mismo *dimple* de la muela. Para un avance de rectificado más rápido o más lento el espaciado será mayor o menor respectivamente, consiguiendo así una densidad menor o mayor de *dimples*.

Se muestra el siguiente diagrama como resumen de la influencia del largo de *dimple* creado en la muela y la velocidad de avance (fig. 3). En él se puede ver que, para una misma velocidad de avance, la distancia longitudinal entre *dimples* es la misma, pero dependiendo de la longitud del *dimple* que se haya creado en la muela con el diamantado el área superficial de la textura puede ser mayor o menor. De la misma manera, si se varía la velocidad de avance para una misma textura de muela, varía la distancia longitudinal entre *dimples*, pero también la longitud de estos (como se muestra la ecuación 2.1).

2.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS DE RECTIFICADO Y GENERACIÓN DE SEÑAL

Con el objetivo de automatizar el cálculo de los parámetros de rectificado y generar la señal a comandar al diamantador asistido para obtener en la guía una textura que cumple con todos los requisitos definidos, se ha desarrollado un modelo que tiene en cuenta la influencia de todos los parámetros anteriormente analizados. En líneas generales, el modelo funciona de la siguiente manera:

1. Se definen las dimensiones del área de contacto y el porcentaje de superficie plana con respecto a la superficie total que se quiere conseguir en la zona (*perc*). Esta proporción se mantendrá constante a lo largo de la guía.
2. Se define el tamaño del *dimple* que se quiere obtener en términos de longitud (l_{dimp}), ancho (w_{dimp}) y profundidad (a_{dimp}).
3. Se definen los parámetros de diamantado teniendo en cuenta la calidad superficial que hay que obtener en las zonas de la guía en la que no hay *dimples* y también las limitaciones de la máquina. Por ejemplo, es importante tener en cuenta que la velocidad de giro de la muela en el diamantado (n_{sd}) y la velocidad de giro de la muela en el rectificado (n_s) tienen que ser iguales y que esta velocidad de giro afecta a la velocidad de avance necesaria para conseguir la textura deseada.
4. Se realiza el cálculo de los parámetros de rectificado a comandar en la máquina para obtener la textura deseada:
   - $a_e = a_{dimp}$
   - $n_s = n_{sd}$
   - $Nº\ de\ pasadas = 1$
   - $v_w = n_s \cdot (l_{dimp} - 2 \cdot \sqrt{d_s \cdot a_e}) \cdot nº\ puntos\ muela / nº\ puntos\ dimple$
5. Se genera la señal para el diamantador asistido, creando una matriz de dimensiones que representa la superficie de la muela (fig. 4). En esta superficie se simula una pasada de diamantado (a_d) excepto en las áreas en las que el diamantador se tiene que retirar para crear las texturas.
6. Esta señal se carga en el software desarrollado para la aplicación, en la que se define el tipo de piezoeléctrico que se va a utilizar. De esta forma la señal generada anteriormente se traduce en el voltaje a comandar al piezoeléctrico en cada instante. Esta señal de voltaje es la que controla la mayor o menor penetración del diamantador en la muela, generando así la textura. Durante el diamantado con el fin de controlar el largo (l_{dimp}), ancho (w_{dimp}) y profundidad de *dimple* (a_{dimp}) que estamos generando en la muela, se adquiere la señal real de voltaje del piezoeléctrico y se compara con la generada con el software.

3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la generación de texturas empleando el modelo desarrollado en el anterior apartado, así como los resultados de los coeficientes de fricción obtenidos en las pruebas tribológicas para cada textura. Se ha trabajado con un centro de mecanizado DS-630, una muela de Norton de diámetro 320 mm y un diamantador monopunta con un ancho efectivo de 0,8 mm.

3.1. GENERACIÓN DE TEXTURAS

3.1.1. Diseño de probetas

Para simular el funcionamiento de las guías y los carros de las máquinas y teniendo en cuenta las características del tribómetro

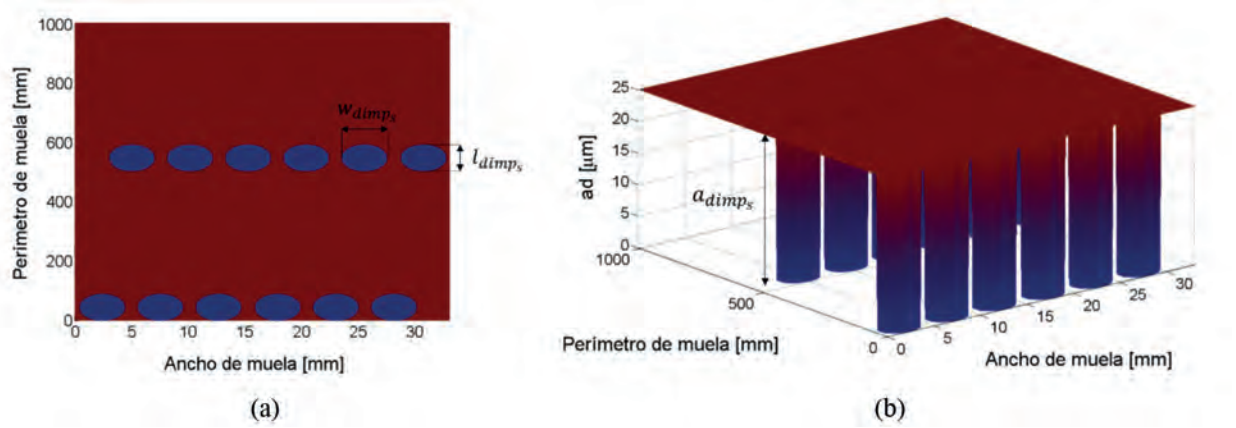


Fig. 4: Señal FDS para texturizar la muela (a) 2D, (b) 3D

en el que posteriormente se van a realizar las pruebas tribológicas, se han diseñado dos probetas:

- Miniguía: probeta de GG30 con una superficie de 64x40 mm sobre la que se generan las texturas mediante rectificado.
- Minicarro: probeta compuesta por un cuerpo cuadrado de GG30 en cuya superficie de 30x30 mm se pega una tira de turcite de espesor 3 mm.

3.1.2. Rectificado previo de probetas

Antes de generar las texturas en la superficie de las miniguías es necesario rectificar tanto las miniguías como los minicarros para conseguir las tolerancias superficiales (Ra = 0,8) que se le exigen a este tipo de superficies. Para ello se rectifican todas las superficies con parámetros similares a los que se emplean en la actualidad en el rectificado de las superficies de guías y carros, las cuales se muestran en la tabla I. Con estas condiciones se ha obtenido en la dirección transversal una rugosidad Ra = 0,42 y Rz = 2,13.

	Condiciones habituales	Pruebas Ideko
Muela	Muela con elevada porosidad, tamaño de grano basto 46-60 y dureza baja F-H.	Norton Vortex IP A60F.H 26VTX2
Velocidad de corte (m/s)	25-35	33
Avance (mm/min)	15000-25000	9390
Pasada de rectificado (mm)	0,005	0,005
Diamantado avance (mm/min)	120-240	200
Diamantado pasadas	2x0,02	2x0,02
Pasadas Chispeo	2-4	4

Tabla I: Condiciones de diamantado y rectificado previo de probetas

3.1.2. Texturizado de miniguías

Con el objetivo de definir las texturas, en primer lugar, se ha realizado un análisis de la superficie que se genera en las guías de las máquinas mediante el floreteado. En las siguientes fig. 5a y fig. 5b obtenidas mediante el microscopio confocal, se muestra la topografía de una superficie floreteada. En el perfil A obtenido de la medición se puede ver que la profundidad de los surcos generados no es constante siendo la profundidad media de 12 µm aproximadamente (fig. 5c). En el perfil B, se puede ver que el ancho medio de la zona más grande de las formas escamadas que se generan con el floreteado es de 3,7 mm. Aplicando la curva de Abbott Firestone a esta superficie se ha visto que tiene un 25% de superficie plana con respecto a superficie total.

Teniendo en cuenta todo esto se han definido las texturas que se muestran en la tabla II. Se ha creado una textura base de 12 µm de profundidad con un porcentaje del 25% de superficie plana con respecto a superficie total para simular el floreteado. A partir de esta, se han generado otras cinco probetas más con diferentes profundidades y densidades de surco para ver cómo afectan estas características al coeficiente de fricción. Todas las texturas creadas tienen una anchura de *dimple* de 3,7 mm.

Para todos los casos la muela se ha diamantado con las siguientes condiciones: n_{sd}= 1800 rpm, a_{vd}= 0,1 mm/rev y a_d= 25 µm. Empleando las condiciones de rectificado que se muestran para cada caso, la topografía de la superficie resultante en cada una de las miniguías es la que se puede ver en las imágenes obtenidas con el microscopio confocal.

Las mediciones realizadas con el confocal sirven para validar el modelo de cálculo de parámetros de rectificado y generación de la señal del diamantador asistido. De las topografías obtenidas se ha extraído el perfil de la superficie donde se puede medir el ancho y la profundidad de *dimple* para comprobar que coincide con lo definido. Además, aplicando la curva de Abbott Firestone se ha verificado que la proporción de superficie plana con respecto de superficie total es la comandada. De esta forma, los resultados obtenidos han servido para validar el modelo.

3.2. PRUEBAS TRIBOLÓGICAS

Con el objetivo de analizar la influencia de las diferentes texturas en el coeficiente de fricción y compararlas con el floreteado se realizan las pruebas tribológicas que se describen a continuación.

Se montan en un tribómetro UMT-3 de CETR las probetas en parejas, una miniguía y un minicarro. Durante los ensayos, la miniguía está fija y el minicarro se mueve a para simular el movimiento relativo entre la guía y el carro de la máquina. El movimiento lineal oscilatorio que hace el minicarro tiene un desplazamiento d de 10 mm y una frecuencia f de 0'1, 1, 7'5 y 15 Hz. La velocidad lineal es continuamente variable dentro de un ciclo, pero se toma como valor representativo $V=2\cdot d\cdot f$, lo que supone velocidades de 120-18000 mm/min.

A continuación, se muestra una comparativa de los resultados de fricción obtenidos para la probeta floreteada y las probetas con diferentes texturas, para diferentes frecuencias (fig. 6).

Como se puede ver, la textura floreteada muestra una tendencia a aumentar el coeficiente de fricción a medida que aumenta la frecuencia del movimiento oscilatorio, es decir, para mayores velocidades de desplazamiento del carro. Comparando el comportamiento de la miniguía floreteada con la textura base, se

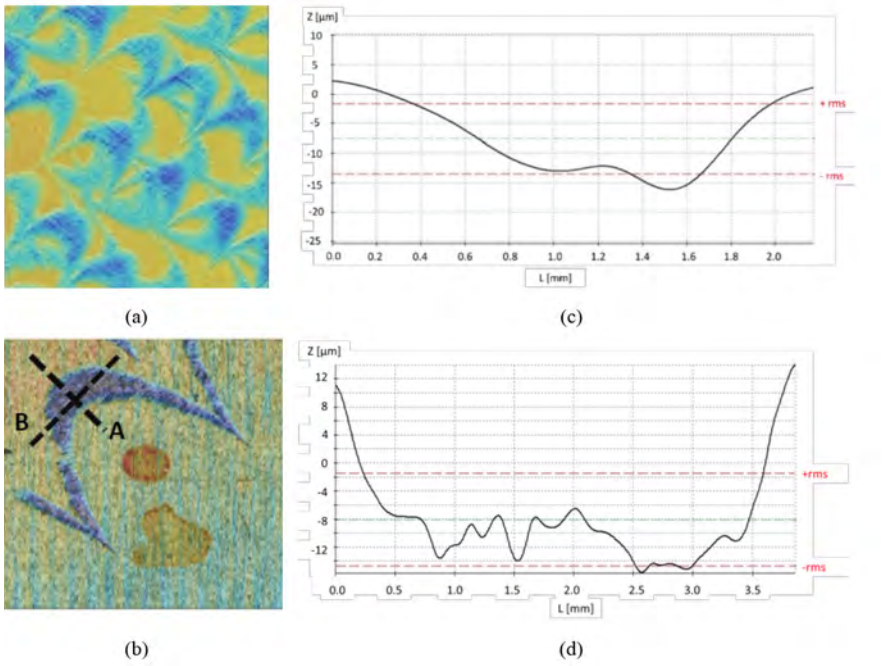


Fig. 5: Topografía del confocal de la probeta floreteada (a), detalle escama floreteado (b), perfil A del surco (c), perfil B del surco (d)

puede ver que para frecuencias bajas el coeficiente de fricción es bastante similar, sin embargo, a medida que aumenta la frecuencia, la diferencia es más significativa ya que para la miniguía floreteada el coeficiente de fricción va en aumento y para la textura base va disminuyendo.

Entre las texturas con la misma profundidad de *dimple*, se observa que una menor proporción de superficie plana frente a superficie total, es decir, una densidad mayor de *dimples*, es mejor a la hora de obtener coeficientes de fricción bajos. En cuanto a la profundidad de *dimples* para una misma concentración, se observa que en general las probetas con mayor profundidad obtienen mejores resultados de coeficiente de fricción.

Comparando los resultados obtenidos con el floreteado frente a los obtenidos con las diferentes texturas, en general se puede observar que las texturas muestran coeficientes de fricción mejores sobre todo para frecuencias altas, en las que las texturas

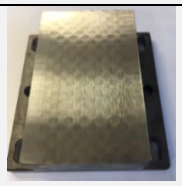
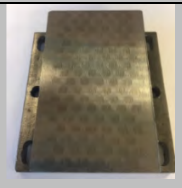
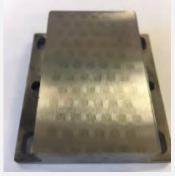
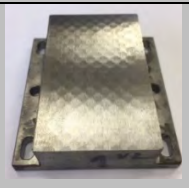
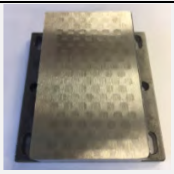
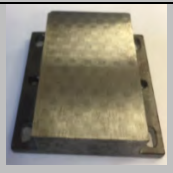
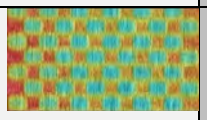
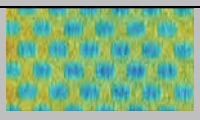
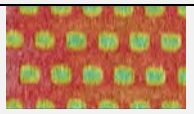
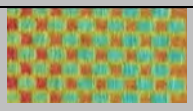
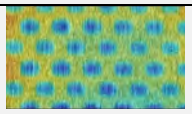
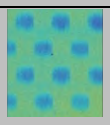
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Textura deseada en la superficie de contacto	$a_{dimp} = 12\ \mu m$ $perc = 25$	$a_{dimp} = 12\ \mu m$ $perc = 45\%$	$a_{dimp} = 12\ \mu m$ $perc = 66\%$	$a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 25\%$	$a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 45\%$	$a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 66\%$
Condiciones rectificado	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 12\ \mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 9028\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 12\ \mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 12352\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 12\ \mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 19923\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 8\mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 9000\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 8\mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 12273\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 8\mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 19919\ \frac{mm}{min}$
Probeta texturizada						
Validación de la textura (topografía obtenida en el	 $a_{dimp} = 10\ \mu m$ $perc = 23{,}15\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 11\ \mu m$ $perc = 47{,}99\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 11\ \mu m$ $perc = 69{,}20\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 20{,}68\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 44{,}58\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 63\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$

Tabla II: Definición de texturas, condiciones de diamantado y rectificado y topografía obtenida

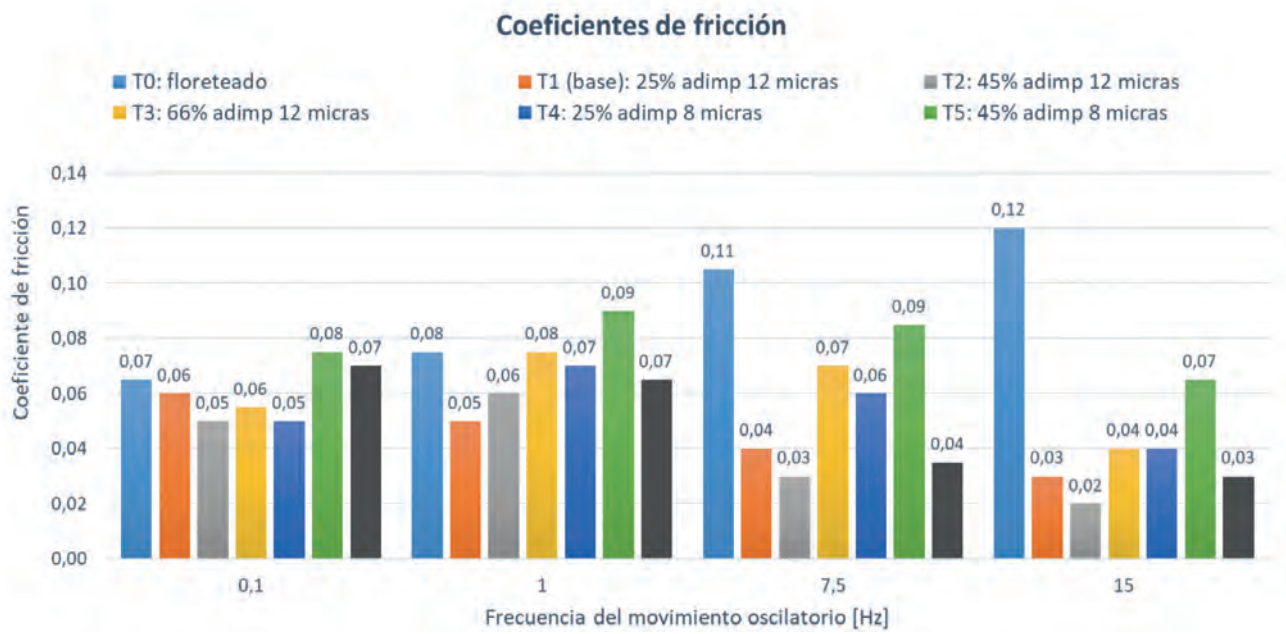


Fig. 6: Comparativa coeficientes de fricción de miniguías texturizadas

tienden a reducir el coeficiente de fricción al contrario que el floreteado. Las texturas T1 (base) y T2 son las que mejores resultados han dado.

4. DISCUSIÓN

Con la investigación desarrollada se ha dado respuesta a una problemática que hasta la fecha se resuelve de manera manual mediante floreteado. Se ha presentado tanto el modelo teórico como las pruebas de experimentación empleando tecnologías avanzadas de acuerdo con el estado del arte actual. Los resultados de fricción obtenidos mediante los ensayos tribológicos realizados para diferentes texturas generadas demuestran que el texturizado por rectificado es una alternativa con mayor potencial que el floreteado para su aplicación en la lubricación de las guías dentro del sector de la máquina herramienta. Estas ventajas competitivas se traducen en:

- Reducción coeficientes de fricción un 14-28% para frecuencias bajas y del 75-80% para frecuencias altas.
- Posibilidad generar diferentes texturas de forma controlada y repetitiva utilizando el dispositivo de diamantado asistido y el modelo de cálculo de los parámetros de rectificado desarrollados. Prueba de ello son los resultados de las mediciones del confocal en las que se observa que las texturas obtenidas como resultado son prácticamente iguales a las definidas (en la profundidad del surco el error es de entre 0 y 16% y en la densidad de la textura el error es de 5-17%).
- Reducción del tiempo necesario para conseguir las texturas, por tratarse de un proceso automatizado, sin aumentar significativamente los costes de operación ya que el rectificado ya forma parte del proceso de fabricación de las guías.

En vista de los resultados positivos obtenidos los próximos pasos pasan por introducir esta tecnología en el proceso real de fabricación de las guías de la máquina herramienta para analizar si estas mejoras del coeficiente de fricción se traducen en la mejora del funcionamiento de las máquinas en relación a la precisión obtenida observando efectos como el *stick-slip* o al comportamiento de las guías frente al desgaste.

REFERENCIAS

[1] A.W. Lang, P. Motta, P. Hidalgo, M. Westcott. "Bristled shark skin: a microgeometry for boundary layer control?". Bioinspiration & Biomimetics. Octubre 2008. Vol. 3 – 046005. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-3182/3/4/046005.

[2] P.C. Salaberry. "Vehicle with drag-reducing outer surface". U.S. Patent 7810867 B2. 2010.

[3] N. Tagawa, D.B. Bogy. "Air film dynamics for micro-textured flying head slider bearings in magnetic hard disk drives". Journal of Tribology. Mayo 2002. Vol.124-3. p. 568-574. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1456084

[4] Z. Krzyzak, P. Pawlus, "'Zero-wear' of piston skirt surface topography". Wear. Febrero 2016. Vol.260-4. p.554-561. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.038

[5] S. Świrad. "The surface texture analysis after sliding burnishing with cylindrical elements". Wear. Junio 2011. Vol.271-3. p.576-581. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.05.005

[6] L. Galda. P. Pawlus, J. Sep. "Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribek curve". Tribology International. Octubre 2009. Vol. 42-10. p.1505-1512. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.06.001

[7] L. Galda, A. Dzierwa, J. Sep, P. Pawlus. "The effect of oil pockets shape and distribution on seizure Resistance in Lubricated Sliding". Tribology letters. Febrero 2010. Vol.37-2. p.301-311. DOI: https://doi.org/10.1007/s11249-009-9522-7

[8] A. Kovalchenko, O. Ajayi, A. Erdemir, G. Fensle, I. Etsion. "The effect of laser Surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact". Tribology International. Marzo 2005. Vol.38-3. p.219-225. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.004

[9] M. Nakano, A. Korenaga, A. Korenaga, K. Miyake, T. Murakami, Y. Ando, H. Usami, S. Sasaki. "Applying Micro-Texture to Cat iron Surfaces to Reduce the Friction Coefficient Under Lubricated Conditions". Tribology letters. Noviembre 2007. Vol.28-2. p.131-137. DOI: https://doi.org/10.1007/s11249-007-9257-2

[10] P. Stepien, M.Szafarczyk. "Generation of Regular Patterns on Ground Surfaces". CIRP Annals. Enero 1989. Vol.38-1. p.561-566. DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62769-3

[11] P. Stepien, B. Balasz. "Simulation of the formation process of regular grooves on the ground surface". Proceedings of the fourth annual industrial simulation conference, Eurosis, Palermo. Enero 2006. Vol. 269-276.

[12] P. Stepien. "Three Basic Types of Regular Surface Texture Generated by Plunge Grinding with the wheel having helical grooves". Advances in Manufacturing Science and Technology. 2006. Vol.30-3. p.37-54.

[13] P. Stepien. "Grinding forces in regular surface texture generation". International Journal of Machine Tools and Manufacture. Noviembre 2007. Vol.45-14. p.2098-2110. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.05.004

[14] P. Stepien. "The mechanism of grinding wheel surface reproduction in regular Surface texture generation". Surface Engineering. Mayo 2008. Vol.24-3. p.219-225. DOI: https://doi.org/10.1179/174329408X282596

[15] P. Stepien. "Regular Surface Texture Generated by Special Grinding Process". Journal of Manufacturing Science. Enero 2009. Vol.131-1.

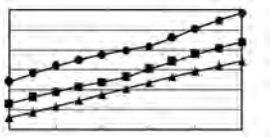
[16] B. Denkena, L. de Leon, B. Wang. "Grinding of microstructured functional surfaces: a novel strategy for dressing of microprofiles". Production Engineering. Marzo 2009. Vol.3-1. p.41-48. DOI: https://doi.org/10.1007/s11740-008-0134-0

[17] B. Denkena, J. Kohler, B. Wang. "Manufacturing of functional riblet structures by profile grinding". CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Septiembre 2010. Vol.3-1. p.14-26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.08.001

[18] J.F.G. Oliveira, A.C. Bottene, T.V. Franca. "A novel dressing technique for texturing of ground surfaces". CIRP Annals. Abril 2010. Vol.59-1. p.361-364. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.119

[19] E. J. da Silva, J. F. G. de Oliveira, B. B. Salles, R. S. Cardoso, V. R. A. Reis. "Strategies for production of parts textured by grinding using patterned wheels". CIRP Annals. Abril 2019. Vol. 62-1. p.355-358. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.123

Genetic algorithm optimal arrangement of positive and negative stiffness dampers for hybrid damping based on seismic waves method



Disposición óptima de un algoritmo genético de amortiguadores de rigidez positiva y negativa para la amortiguación híbrida basada en el método de ondas sísmicas

Fu Jie[1], Shao Zhenhua[2,3], Liu Mingxing[1]

[1] School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Changbei Open and Developing District, Nanchang, 330013, China
[2] College of Computer and Control Engineering, Minjiang University,Xiyuangong Road 200#,Fuzhou,36100,China, 172097792@qq.com
[3] King's College London, University of London,London,30Aldwych,Lodon,WC2B 4BG,United Kingdom

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9362 | Recibido: 15/08/2019 • Inicio Evaluación: 15/08/2019 • Aceptado: 08/10/2019

RESUMEN

• El aumento de la rigidez negativa puede llevar a un mayor desplazamiento entre capas. Por lo tanto, se debe analizar la influencia de muchos factores entre los amortiguadores de rigidez pseudo-negativa y el desplazamiento entre capas. Con el fin de revelar la relación cualitativa entre la amortiguación híbrida y los parámetros estructurales, se propone un nuevo método que optimiza los parámetros estructurales de los amortiguadores basados en el método de ondas sísmicas con la ayuda de MATLAB y la plataforma funcional SAP2000 OAPI. En primer lugar, un amortiguador de rigidez negativa fue simulado de forma aproximada por la combinación de una unidad de amortiguación paralela y una unidad elástica multilínea, y se investigó el modelo de referencia correspondiente. En segundo lugar, se desarrolló el programa de optimización de la amortiguación estructural de amortiguadores basado en un algoritmo genético. El análisis de optimización de la amortiguación mixta de los amortiguadores de rigidez positiva y negativa se llevó a cabo en el modelo de referencia del bastidor de acero de 20 pisos. La amortiguación de las diferentes rigideces se resumió sobre la base de los resultados de los análisis, y en el estudio se discutió el principio general de disposición del dispositivo en la estructura del edificio. Finalmente, el amortiguador híbrido se formó con el amortiguador de rigidez pseudo-negativo y el amortiguador de rigidez positiva tradicional. El principio de diseño y el efecto de reducción de vibraciones de la amortiguación híbrida se verificaron mediante experimentos con MATLAB y la plataforma funcional SAP2000 OAPI. Los resultados muestran que la aceleración del piso superior de la estructura bajo la acción de la onda El Centro y de la onda de Kobe se reduce en aproximadamente un 15% cuando se utiliza el amortiguador de rigidez pseudo-negativa. Mientras tanto, el desplazamiento de la parte inferior de la estructura se incrementa en sólo un 5%. Además, se pueden obtener mejores resultados de control mediante las diferentes estrategias de control y un análisis exhaustivo de los factores de influencia utilizados en los niveles 2-12 y 13-20. El método propuesto proporciona referencias para optimizar la construcción de plataformas experimentales y la evaluación experimental de amortiguadores híbridos.

• **Palabras clave:** Amortiguador de rigidez negativa, Amortiguación de parámetros estructurales, Pico de desplazamiento entre capas, Algoritmo genético, Optimización de parámetros.

ABSTRACT

Increasing negative stiffness may lead to enhanced interlayer displacement. Therefore, the influence of many factors between pseudo-negative stiffness dampers and interlayer displacement should be analyzed. In order to reveal the qualitative relationship between hybrid damping and structural parameters, a novel method that optimizes the structural parameters of dampers based on based on seismic waves method with the help of MATLAB and the SAP2000 OAPI function platform is proposed. First, a negative stiffness damper was approximately simulated by the combination of a parallel damper unit and a multiline elastic unit, and the corresponding benchmark model was investigated. Second, the optimization program of structural damper damping based on a genetic algorithm was developed. Optimization analysis of the mixed damping of positive and negative stiffness dampers was conducted on the 20-story steel frame benchmark model. The damping of different stiffness was summarized on the basis of the analysis results, and the general arrangement principle of the device in the high-rise structure was discussed in the study. Finally, the hybrid damping was formed by the pseudo-negative stiffness damper and the traditional positive stiffness damper. The layout principle and vibration reduction effect of the hybrid damping were verified by experiments under MATLAB and the SAP2000 OAPI function platform. Results show that the top floor acceleration of the structure under the action of the El Centro wave and Kobe wave is reduced by approximately 15% when the pseudo-negative stiffness damper is used. Meanwhile, the displacement of the lower part of the structure is increased by only 5%. Furthermore, enhanced control results can be obtained by the different control strategies and a thorough analysis of the influencing factors used in layers 2–12 and 13–20. The proposed method provides references for optimizing the experimental platform construction and experimental evaluation of hybrid damping dampers.

Keywords: Negative stiffness damper, Structural parameter damping, Interlayer displacement peak, Genetic algorithm, Parameter optimization.

1. INTRODUCTION

With the continuous development of modern control theory, the damping control of building structures has been rapidly developing in recent years. In particular, scholars have been studying the application of the negative stiffness principle on the damping control of building structures [1-3]. Theoretical analysis has verified that installing a negative stiffness device in a structure can provide the damping ratio of the building structure, thereby enabling the acceleration response of the structure to be con-

trolled under earthquake action [4-5]. Therefore, extending the period of a building structure is an effective means of reducing the acceleration of the structure based on the idea of realizing control without increasing or reducing the structural stiffness. One way to extend such period is to reduce the rigidity of the building structure. Thus, a cascade-structural negative stiffness control method with a positive and negative stiffness damping (NSD) device is proposed. In precision manufacturing, the principle of negative stiffness has also been applied to mechanical vibration control [6-7]. Lemuria H.[1] proposed the use of magnetorheological dampers combined with a specific control algorithm to realize a pseudo-negative stiffness damper and achieve structural NSD. A negative stiffness structural vibration control scheme was also proposed through the development of a NSD component that was combined with ordinary rubber bearings to form a new isolation system.However, the layout of pseudo-negative stiffness dampers in high-rise building structures has not been thoroughly discussed [8-11], especially for the seismic analysis of multilayer steel structures. In light of this issue, with the help of the investigation of Shahadat et al. [12-15], the current study mainly discusses the existence of negative stiffness grade steel structure systems with different properties, such as friction nonlinearity. Accurately determining the acceleration analysis of pseudo-negative stiffness dampers for rigid-structured buildings is an urgent problem.

2. STATE OF ART

Many researchers have studied the trajectory control of control systems with pseudo-negative and positive and negative stiffness dampers. The Grunwald–Letnikov method, which was proposed by R. Scherer et al. [15-20], can qualitatively analyze the stability, convergence, and nonlinearity of differential systems, but the technique is complex and only applicable to fractional-order chaotic systems. Furthermore, Y. Huang [21] considered the approximate free control of a vehicle active suspension with hydraulic actuators, but the time lag effect of the hydraulic actuator and the combined control of the hybrid damping were not examined in detail. C. Hua [21] discussed the unknown semi-dead zone of the control input and proposed the adaptive predetermined performance control of a vehicle active suspension system but did not further explore the combination of acceleration and displacement peaks. Additionally, C. Gorges [23] used a machine learning rough set classification method to detect road bumps, but the quantitative analysis of its damping strategy and anti-vibration mechanism needs in-depth study. J. Zhao [24] realized an automotive variable hydraulic shock absorber and adopted valley search to optimize the PID method. However, the variable coefficient and degree of freedom configuration sequence require further discussion.

In this study, the description function method is used to analyze the nonlinear problems caused by seismic waves or irregular vibrations to achieve hybrid damping in a developed system. The hybrid damper system developed by this study is a 20-story steel frame benchmark model. Such a system is typically significantly different between the 2nd–12th and 13th–20th floors subjected to different seismic wave vibrations and propagation seismic mechanisms; this condition leads to differences in displacement between structural floors caused by the nonlinear friction of such systems [12]. Different control strategies and influence factors need to be analyzed, especially for floors 2-12 and 13-20, to optimize the parameters of pseudo-negative stiffness dampers. In theory, all kinds of complex finite element problems can be deal with the help of Matlab. However the structure is not simplified and the modeling process will be very complex, which does not meet the actual application requirements. In order to avoid the difficulty of complex structure modeling, this paper provides a mixed use of MATLAB and SAP2000 analysis method, In order to solve the above contradictions and make the optimization algorithm widely used in the engineering field, this chapter proposes a very simple way: to model the structure in SAP2000, and to call the SAP2000's open application programming interface (OAPI) in MATLAB with the genetic algorithm function to write the optimization program to optimize the damper layout. In this chapter, a simplified model of a ten story structure and a 20 story steel frame of the second stage benchmark structure are taken as the research objects, respectively. The optimal arrangement of positive and negative stiffness dampers based on genetic algorithm is studied.

The remainder of this study is organized as follows. Section 3 describes the common methods of evolutionary computation and the flow and specificity of the genetic algorithm in the processing of multilayer steel structures. In particular, this chapter analyzes the construction of a mathematical model of the 20-story steel structure as the first-stage benchmark problem. Section 4 studies the vibration reduction optimization of the model with the reference structure and then analyzes the different control strategies and influencing factors of the 2nd-12th and 13th-20th floors. The last section summarizes the study and uses the experimental results to verify the arrangement principle and damping effect of the hybrid damping by pseudo-negative and traditional positive stiffness damper.

3. METHODOLOGY

3.1. SAP2000 NUMERICAL MODEL OF STRUCTURE

3.1.1. 20-STORY STEEL STRUCTURE MODEL

A benchmark model is selected in this study to analyze the third stage of the 20-floor nonlinear steel frame structure. A numerical model is established to provide the mathematical model basis for the succeeding finite element analysis. The size of the structural plane is 30.48 m×36.58 m.Its height is 80.77 m, the east–west span is 6 spans, the north–south span is 5 spans, and the average distance of span is 6.10 m. The height of the two underground floors is 3.65 m, the height of the first floor 5.49 m, and the height of the 2nd to 20th floors 3.96 m. The beam is made of I-shaped steel with a compressive strength of 248 MPa, and the column is made of I-shaped steel with a compressive strength of 345 MPa [10]. The finite element model of the steel structure was established in SAP2000 (Figure 1). The beam and column are made of steel, the floor is made of concrete, and the component dimensions and constraints are set according to the literature [10].

Table I lists the first 10 natural frequencies of the model constructed in this study and compares them with the natural frequency given by the American Society of Civil Engineers (ASCE). The data show a small difference between the two sets of frequencies. Moreover, the shape formed by the first three orders of the structure obtained in SAP2000 is completely consistent with the mode shape given by ASCE. The shape pattern is omitted due to space restrictions. *Table II* lists the seismic response of the benchmark structure under the action of the *El Centro* wave (1940, NS) and the *Kobe* wave (1995, NS). The data show that the results of SAP2000 analysis are considerably similar to those provided by ASCE. In summary, the benchmark model established in SAP2000 is correct and can be utilized as the basis of vibration reduction analysis.

Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SAP2000	0.27	0.75	1.28	1.80	2.35	2.72	3.05	3.32	3.80	4.34
ASCE	0.26	0.75	1.30	1.83	2.40	2.80	3.00	3.21	3.63	4.31

Table I: Natural vibration frequency of the benchmark structure (Unit: Hz)

	El Centro wave (Peak 3.417 m · s $^{-2}$)		Kobe wave (Peak 8.178 m · s $^{-2}$)	
	SAP2000	ASCE	SAP2000	ASCE
Peak displacement /m	0.3203	0.3044	0.5248	0.5173
Peak speed / m · s $^{-1}$	0.9231	0.9157	1.8830	1.8458
Peak acceleration / m · s $^{-2}$	5.4960	5.3392	10.3751	9.9741

Table II: Seismic response of the benchmark structure without control

3.1.2. DAMPER MODEL

The basic concept of stiffness K is the ratio of load increment d*F* and deformation increment d*X* i.e., k = d*F* / d*X*; when the direction of load increment and deformation increment is opposite, it is negative stiffness.The pseudo-negative stiffness damper that needs to be investigated in this work does not have a direct corresponding model in SAP2000.The damping force can be expressed as the following:

$$F[t,x(t)] = cv^{\alpha} + f_N[t,x(t)] \tag{1}$$

$$f_N[t,x(t)] = k_N x(t) \qquad (k_N \le 0) \tag{2}$$

Eqs. (1,2) show that the control force *F [t,x(t)]* of the pseudo-negative stiffness damper can be decomposed into the sum of the ordinary damping force cv^{α} and the negative stiffness control force $k_N x(t)$. On this basis, a damper unit and a linear unit are paralleled in SAP2000 to simulate the pseudo-negative stiffness damper. The stiffness of the linear unit is set to a negative value. If the rigidity of the linear unit is positive, then the damper becomes a conventional positive stiffness damper.

3.2. VIBRATION REDUCTION ANALYSIS OF THE DOUBLE-DEGREE-OF-FREEDOM SYSTEM

When hybrid damping control with the positive and negative stiffness damper is applied to the 20-story steel frame benchmark model, the control strategy should be optimized by double-degree-of-freedom vibration reduction analysis because the degrees of freedom of the 2nd-12th and 13th-20th floors are inconsistent with the control structure[17].

3.2.1. MODEL ANALYSIS OF DOUBLE FREEDOM NSD SYSTEM

After a pseudo-negative stiffness damper is added to a multi-degree-of-freedom structure, the forced vibration differential equation becomes

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C_p + C_N]\{\dot{x}\} + [k_p + k_N]\{x\} = \{P(t)\} \tag{3}$$

where C_p and k_p are the damping coefficient and stiffness of the system itself, respectively; C_N and k_N are the damping and stiffness of the negative stiffness damper, respectively, $K_N<0$. The model shown in Fig. 3 depicts the object of study. C_1, k_{N1}, C_2, and k_{N2} are the negative stiffness damper parameters of the model. x_1 and x_2 are the displacements of the structural and second floors, respectively. The matrices of the structural vibration equation are expressed as follows:

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$[C_p + C_N] = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$[k_p + k_N] = \begin{bmatrix} 2k + k_{N1} + k_{N2} & -(k + k_{N2}) \\ -(k + k_{N2}) & k + k_{N2} \end{bmatrix} \tag{6}$$

First, from the perspective of structural vibration mode, structural damping does not need to be considered. Let the displacement of the structure be:

$$\begin{cases} x_1(t) = X_1 \sin(\omega t - \alpha) \\ x_2(t) = X_2 \sin(\omega t - \beta) \end{cases} \tag{7}$$

Set the two modes of the structure as:

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ A_1 \end{Bmatrix} and \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ A_2 \end{Bmatrix} \tag{8}$$

Eq. (3) is substituted to solve:

$$A_{1,2} = 1 - \frac{1}{2}\left\{1 \pm \left[\sigma^2 + 3\sigma + 4\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \tag{9}$$

where $\sigma = \dfrac{k + k_{N1}}{k + k_{N2}}, (\sigma > 0)$.

An analysis of Eq. (9) shows that the displacement response of the upper structure A_1, A_2 must increase with σ. Given that $k_N<0$, the more noticeable the trend of $|k_{N1}|>|k_{N2}|$, the more beneficial it is for vibration reduction.

3.2.2. VIBRATION REDUCTION ANALYSIS OF NEGATIVE STIFFNESS DAMPER WITH SINGLE-FLOOR ARRANGEMENT

According to Ref. 4, take $m=1x10^5 kg$, $k=2x10^7 N/m$ in the structure of Fig. 2. When the structure is not set with vibration damping measures, the first two orders of natural vibration frequency correspond to 1.97 and 5.15 *Hz*. The frequency range of the sinusoidal sweep acceleration with a peak input of 2 m/s^2·t is 1-8 *Hz*. With the help of modeling analysis under Simulink, the equation of state in Eq. (10) can be obtained as follow.

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = Z_2 \\ \dot{Z}_2 = \dfrac{-(2k + k_{N1} + k_{N2})Z_1 - (C_1 + C_2)Z_2 + (k + k_{N2})Z_3 + C_2 Z_4 + f(t)}{m_1} \\ \dot{Z}_3 = Z_4 \\ \dot{Z}_4 = \dfrac{(k + k_{N1})Z_1 + C_1 Z_2 - (k + k_{N2})Z_3 - C_2 Z_4 + f(t)}{m_2} \end{cases} \tag{10}$$

First, we analyze the case where a negative stiffness damper is set on only one floor. Let $k_{N2}=0N/m$, and $C_2=4x10^5N{\cdot}s/m$ (according to Ref. 4). The analysis result is shown in Fig. 1. The stiffness ratio is k_{N1}/k. A ratio greater than zero represents a damper with positive stiffness, and vice versa.

From the results of the above numerical analysis, the following conclusions can be drawn.

(1) With increased first-floor negative stiffness (indicating an increase in absolute value, the same as below), the second-floor acceleration a_2 and the interlayer displacement X_2 are reduced. When the first-floor stiffness ratio is -15%, the second-floor reaction is 10% less than that of ordinary damping.

(2) As the negative stiffness increases, the change of first-floor acceleration a_1 is not remarkable, and nearly no change occurs when the stiffness ratio is between 0% and -20%.

(3) First-floor displacement x_1 increases with the increase of first-floor negative stiffness, but with increased damping coefficient C_1, the growth trend of x_1 gradually slows down. This situation shows that increasing the damping can improve the displacement control effect of NSD.

Table III lists the damping effects of a negative stiffness damper (Case A) in only the first floor and a negative stiffness damper in only a second floor (Case B) to illustrate the effect of the arrangement of the negative stiffness damper on the damping effect of the structure.

The data of A and B in *Table III* show that when the negative stiffness damper is arranged in the second floor, the dynamic response of the structure is noticeably increased, which is not conducive to vibration reduction.

3.2.3. VIBRATION REDUCTION ANALYSIS OF NEGATIVE STIFFNESS DAMPERS WITH TWO-FLOOR ARRANGEMENT

Case 1: A fixed negative stiffness damper with fixed parameters is placed in the first structural floor. Let $k_{N1}=-4x10^6N/m$, and $C_1=1.6x10^6N{\cdot}s/m$. We discuss the change in the structural vibration response when the second-floor negative stiffness damper parameter changes. The analysis results are shown in Figure 3.

Analysis of the data in Figure 2 reveals the following conclusions.

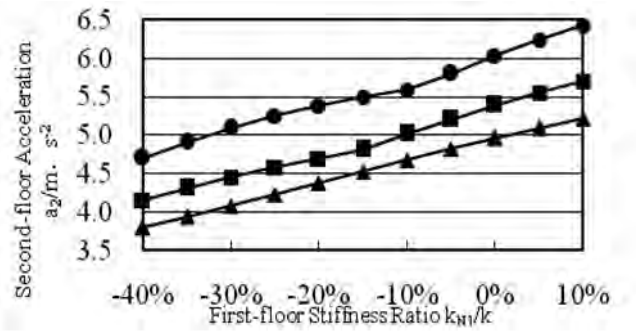
(1) The displacement of the second floor increases significantly with the increase of the negative stiffness ratio of the second floor. When the stiffness ratio is -15%, the displacement of the second floor becomes approximately 12% higher than that of the ordinary damping.

(2) With the increase of the negative stiffness of the second floor, the change of the second-floor acceleration is not evident.

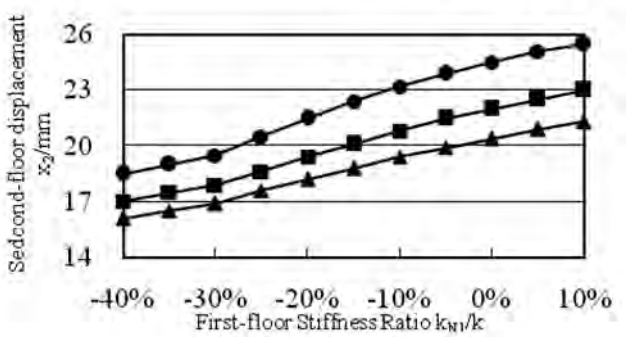
(3) The acceleration and displacement of the first floor decrease with the increase of the negative stiffness of the second floor, but the change is not noticeable. When the stiffness ratio is -15%, the acceleration and displacement of the first floor are reduced by 3% and 1%, respectively, compared with those of the ordinary damping.

Case 2: The same NSD devices are arranged on the upper and lower floors. Let $C_1=C_2=1.6x10^6N{\cdot}s/m$. We discuss the change of the structural vibration response of the second floor when the stiffness ratio changes synchronously. The results are shown in Figure. 3 (see section: supplementary material).

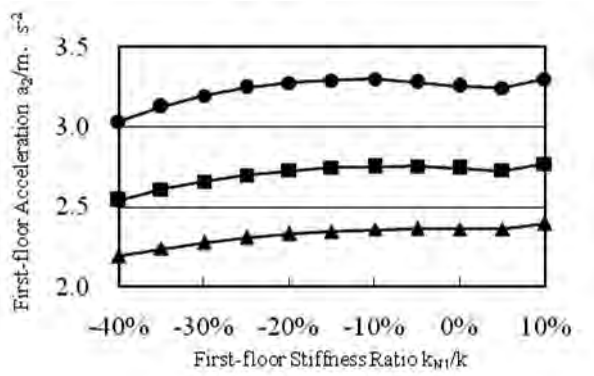
The data in Figure. 3 (see section: supplementary material) reveals that the acceleration response of the structure decreases as



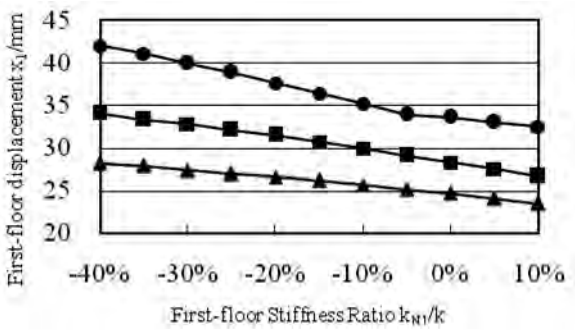
(a) Relationship between the acceleration of the second floor and the stiffness ratio of the first floor



(b) Relationship between the second-floor interfloor displacement and the stiffness ratio of the first floor



(c) Relationship between acceleration and stiffness ratio of the first floor



(d) Relationship between the interfloor displacement and the stiffness ratio of the first floor

$-\bullet-C_1=1.2\times10^6\,N\cdot s/m$ $-\blacksquare-C_1=1.6\times10^6\,N\cdot s/m$ $-\blacktriangle-C_1=2.0\times10^6\,N\cdot s/m$

Fig. 1: Relationship between negative stiffness ratio of the first floor and the peak value of the structural response

Case	floor	Stiffness ratio	Damping coefficient 10^5 N·s / m	Acceleration a m / s²	Interfloor displacement x mm
A	1	-15%	16	2.74	30.7
	2	0	4	4.81	20.1
B	1	0	4	5.01	47.4
	2	-15%	16	6.33	24.4

Table III: Vibration reduction effect when a negative stiffness damper is placed on first or second floors

the stiffness ratio of the second floor decreases, and the interfloor displacement increases as the stiffness ratio decreases. Thus, the negative stiffness device increases the displacement while effectively reducing the structural acceleration response. In addition, the vibration damping effects of the first-floor negative stiffness damper, the second-floor common damper (Case C), and the same negative stiffness damper (Case D) in the two floors are listed in *Table IV*. When the arrangement of Case D is used relative to Case C, the results indicate that the overall acceleration response of the structure decreases, but the interfloor displacement of the second floor increases.

As shown by the above analysis results, the negative stiffness damper should be placed preferentially in the lower part of the structure. If the interfloor displacement meets the requirements, it can also be arranged on the upper part of the structure to further reduce the overall acceleration response of the structure.

3.3. GENETIC ALGORITHM-BASED OPTIMIZATION PROGRAM

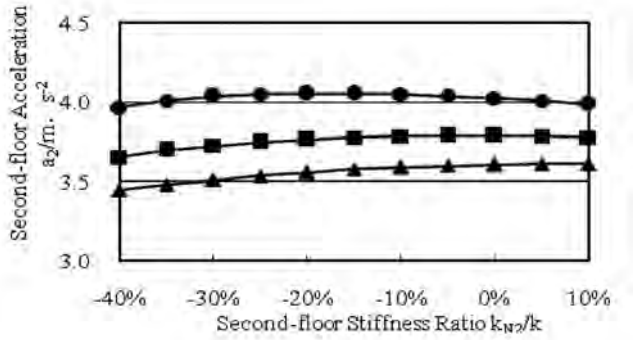
The genetic algorithm belongs to the interdisciplinary disciplines of computer science, intelligent information process, and evolution computing. Its biological basis is the biological evolution of British biologist Darwin. Its optimization process does not need to optimize any information of the object, and it does not depend on the gradient and continuity of the optimized object. Therefore, the genetic algorithm is a robust global optimization algorithm.

3.3.1. OPTIMIZATION PROCESS

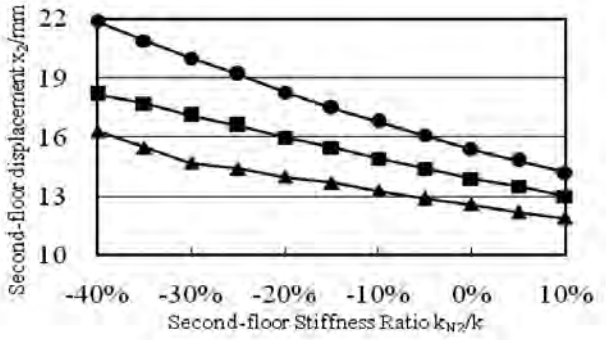
The genetic algorithm optimization function is a built-in feature in MATLAB and can thus be easily used. However, establishing the finite element model of the structure in MATLAB can be cumbersome. Although ASCE provides the stiffness matrix of the benchmark structure that can be used for MATLAB modeling, this issue remains a problem in similar applications for rapid modeling. Therefore, this study builds the benchmark model in SAP2000 and uses MATLAB to call SAP2000's Open Application Programming Interface (OAPI) to analyze the structure. Then, we return the analysis results to MATLAB to complete the optimization of the genetic algorithm. The program flowchart is shown in Figure 4 (see section: supplementary material), where the dotted line is partially completed by SAP2000 and the rest by MATLAB. However, the increase of the negative stiffness in the structure may lead to increased interfloor displacement; moreover, the influence of the pseudo-negative stiffness damper on the displacement between the floors is a key issue considered in this study.

3.3.2. SELECTION OF OPTIMIZATION OBJECTIVE FUNCTION

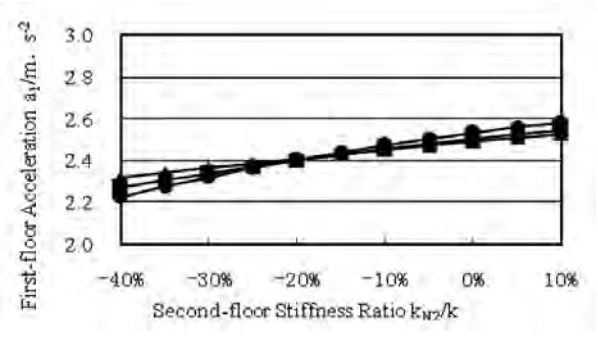
In general, the optimizing design involves three basic elements: design variables, constraints, and objective functions. The design



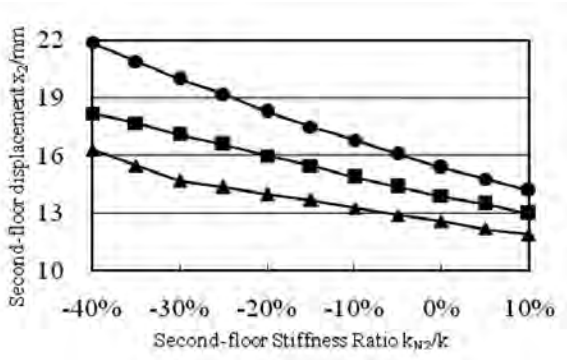
(a) Relationship between acceleration and stiffness ratio of the second floor



(b) Relationship between interfloor displacement and stiffness ratio of the second floor



(c) Relationship between the first-floor acceleration and the second-floor stiffness ratio



(d) Relationship between the first-floor interfloor displacement and the second-floor stiffness ratio

-●- $C_1 = 1.2\times10^6 N\cdot s/m$ -■- $C_1 = 1.6\times10^6 N\cdot s/m$ -▲- $C_1 = 2.0\times10^6 N\cdot s/m$

Fig. 2: Relationship between the second-floor stiffness ratio and the peak response of the structure

Case	Floor	Stiffness ratio	Damping coefficient 10^5 N·s / m	Acceleration a m / s^2	Interfloor displacement x mm
C	1	-15%	16	2.51	28.3
	2	0	16	3.84	14.1
D	1	-15%	16	2.44	28.0
	2	-15%	16	3.83	15.7

Table IV: Vibration reduction effect when a negative stiffness damper is placed on first or second floors

variables in this study are the stiffness values of the dampers. For the sake of generality and comparison with the performance of traditional dampers (positive stiffness) and negative stiffness dampers, the stiffness values of the dampers are allowed to be positive during the optimization process. The reasonable range of stiffness is the constraint of the optimization problem. Given the limited output range of the damper, the optimal range of the damper stiffness is set to -0.3*k* to 0.3*k*, where *k* is the lateral stiffness of the structure. Regarding the objective function, in past approximation studies, scholars have proposed using a linear combination of acceleration, displacement, and other factors (such as the number of dampers and cost) as the objective function. At the same time, the use of the energy relationship as the optimization objective function, which can avoid the problem wherein the optimization results are greatly different due to the selection of seismic waves, has been examined. The optimization objective function of the energy method is

$$\min \quad Z = 1 - \frac{Z_d}{Z_{in}} \tag{11}$$

where Z_d is the energy dissipated by the damper, and Z_{in} is the total input energy of the seismic wave. Adopting this optimization function can avoid the difference between the individual seismic waves and make the shock absorption effect of the same structure on different seismic waves reach a balanced state. The increase of negative stiffness in a structure may lead to increased interfloor displacement. Hence, the influence of the pseudo-negative stiffness damper on the displacement between the floors is a key issue considered in this study. In addition, this work uses the dimensionless dimension of acceleration and interfloor displacement, and the linear combination is utilized as the optimization objective function. The function is

$$\min \quad Z = u_a \frac{a_{\max}}{a'_{\max}} + u_x \frac{x_{\max}}{x'_{\max}} \tag{12}$$

where u_a and u_x are the weight coefficients of acceleration and displacement, respectively. Let $u_a + u_x = 1$; a'_{max} and x'_{max} are constants and denote the maximum acceleration and the maximum interfloor displacement, respectively, of the structure under uncontrolled conditions. a_{max} and x_{max} are the maximum acceleration and maximum interfloor displacement, respectively, of the structure under current conditions. a_{max}/a'_{max} and x_{max}/x'_{max} are the damping rate between acceleration and interfloor displacement.

4. RESULT ANALYSIS AND DISCUSSION

4.1. VIBRATION DAMPING OPTIMIZATION OF RELATED PARAMETERS WITH BENCHMARK STRUCTURE

El Centro wave and the *Kobe* wave are selected as the seismic waves for time history analysis, and the peak acceleration is *6.2m/ s*^{2} (9 degrees rare). The weight coefficient in the optimization objective function Eq. (1) is shown in *Table V*. For comparison and calculation, the damping index of the damper unit on each floor is regarded as 1. The damping coefficient is the same as that in the literature [11].

As can be seen from *Tables V and VI*, this arrangement is the optimal layout scheme of vibration reduction by damping. The optimization variable in this study is the stiffness value of each floor damper, that is, the stiffness value of the linear unit. Given the limited output range of the damper, the optimum range of the stiffness is set to be -8x10^7*N/m* to 8x10^7*N/m*.

4.2. OPTIMIZATION RESULTS AND VIBRATION REDUCTION EFFECTS

The damper stiffness optimization results are shown in Figure5 (see section: supplementary material),. Four optimization calculations are performed using two different seismic waves, and the overall trend is consistent. Therefore, the principle of arrangement of the positive stiffness and pseudo-negative stiffness dampers in the structure can be summarized as follows.

(1) The first floor of the structure should be arranged with a positive stiffness damper. This arrangement is beneficial for reducing the interfloor displacement peak of the structure even when the optimization weight coefficient $k_x = 0$ without considering the interlayer displacement. The first-floor damper stiffness optimization result remains positive.

(2) The damper stiffness of the lower part of the structure's 2nd–12th floors should be negative and gradually increase as the floor increases. The damper stiffness of the upper part of the structure's 13th–20th floors should be positive and gradually increase with the increase of the floor.

To test whether the above optimization results are common and valid, this study selects the El Centro wave, Tangshan wave (1976, EW), and Taft wave (1952, NS) as test samples and then analyzes the structure time history under an acceleration peak value of *6.2m/ s*^{2}. The hybrid damping scheme is the optimization result of Scheme 1. The time history analysis results of El Centro wave and Tangshan wave are shown in Figure. 5 (see section: supplementary material).

The analysis results show that the optimized damper stiffness makes the acceleration of each floor of the structure (except the individual floors) smaller (acceleration peak decreased by approximately 5%) in comparison with that of the ordinary damper with zero stiffness. The interfloor displacement is increased, but the interfloor displacement peak of the entire structure is reduced by about 15%. Under the action of the Taft wave, the same analysis results are obtained.

5. CONCLUSIONS

Method	Seismic wave	K_a	K_x
1	*El Centro*	0.70	0.30
2		0.85	0.15
3		1.00	0.00
4	*Kobe*	0.85	0.15

Table V: List of optimal parameters

Floor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Damping coefficient	7.5	6.5	6.5	6.5	6	6	7	7	6	7	6	5.5	5	5	5	5	4	4	4	4

Table VI: Damping coefficient of each floor (Unit: 10^7 N·s / m)

To explore the optimization characteristics of positive and negative stiffness dampers for hybrid damping, this work reveals the relationship between the stiffness characteristics and acceleration characteristics and interfloor displacement characteristics of positive and negative stiffness dampers. This study starts with the 20-story steel frame benchmark model and uses numerical simulation technology and experimental research to analyze the damping characteristics of different interfloor structures, the acceleration characteristics of steel structures, and the interfloor displacement characteristics of steel structures. The following conclusions could be drawn:

(1) In a high-rise structure, the structural bottom floor shall be provided with a positive stiffness damper, the lower part of the structure shall be arranged with a negative stiffness damper, and the upper part of the structure shall be provided with a positive stiffness damper.

(2) Reasonable arrangement of the pseudo-negative stiffness damper in the structure has an obvious effect (compared with that of the traditional damper) on the control of the structural acceleration and interfloor displacement, but the local interfloor displacement may increase. Thus, the positive and negative stiffness dampers for hybrid damping are better than the ordinary damping scheme.

(3) The mixed programming processing method of MATLAB and SAP2000 proposed in this paper can make full use of SAP2000's modeling advantages and Matlab's optimization analysis function, make intelligent structure analysis more simple, expand the breadth and depth of structure analysis, and provide reference for other similar research. The optimization program based on this method can be used to solve other similar engineering problems.

This study combines laboratory experiments with theoretical research; optimizes the hybrid damping curves with positive and negative stiffness dampers by a genetic algorithm; proposes multilayer steel structures in El Centro, Tangshan (1976, EW), and Taft waves; and reveals the variation law of interfloor displacement and acceleration. The model of positive and negative stiffness dampers for hybrid damping is simplified and close to the actual field, thereby serving as reference for the design of the hybrid vibration reduction, structural design, and subsequent development of high-rise steel structures.

Given the lack of actual data on on-site earthquakes and high-level steel structure monitoring, in future research, interfloor displacement and acceleration monitoring data would be combined with this model for further modification. Additional influencing factors should be considered in future studies. Certainly, this study of positive and negative stiffness dampers for hybrid damping in complex multistory steel structures can improve the accuracy and reliability of future research.

REFERENCES

[1] Iemura H, Pradono M H. "Passive and Semi-active Seismic Response Control of a Cable-stayed Bridge". Journal of Structural Control, September 2002, Vol. 9-3, p. 189-204. DOI: https://dx.doi.org/10.1002/stc.12

[2] M. -S. Kim and S. -C. Chung. "Friction identification of ball-screw driven servomechanisms through the limit cycle analysis". Mechatronics, February 2006, Vol. 16-2, p. 131-140. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2005.09.006

[3] W. R. Kolk and R. A. Lerman. "Nonlinear System Dynamics". New York, NY, USA: Van Nostrand Reinhold, 1992. DOI: https://dx.doi.org/10.1007/978-1-4684-6494-8.

[4] Le T D, Bui M T N, Ahn K K. "Improvement of Vibration Isolation Performance of Isolation System Using Negative Stiffness Structure". IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, March 2016, Vol. 21-3, p. 1561-1571. DOI: https://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2015.2506701

[5] Shao Z, Chen, Tianxiang. "Distributed piecewise filtering design for large-scale networked nonlinear systems". Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, March 2016, Vol. 1, p. 1-12. DOI: https://dx.doi.org/10.1186/s13634-016-0350-2

[6] B. Armstrong and B. Amin. "PID control in the presence of static friction: A comparison of algebraic and describing function". Automatica, May 1996, Vol. 32-5, p. 679-692. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/0005-1098(95)00199-9

[7] M. E. Hoque, T. Mizuno, M. Takasaki, and Y. Ishino. "A Nonlinear Compensator for Zero-Power Control and Its Application to Vibration Isolation System". Transactions of the Society of Instrument & Control Engineers, September 2006, Vol. 42-9, p. 1008-1016. DOI: https://dx.doi.org/10.1115/DETC2005-85175

[8] M. M. Z. Shahadat, T. Mizuno, Y. Ishino, and M. Takasaki. "Analysis of friction-induced oscillation in negative stiffness control system". IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, December 2011, p. 952-957. DOI: https://dx.doi.org/10.1109/CDC. 2011. 6160507

[9] Y. Qin, C. Xiang, Z. Wang, and M. Dong. "Road excitation classification for semi-active suspension system based on system response". Journal of Vibration and Control, July 2018. Vol. 24-13, p. 2732-2748. DOI: https://dx.doi.org/10.1109/CDC. 2015. 7402428

[10] F. B. Duarte and J. T. Machado. "Fractional describing function of systems with coulomb friction". Nonlinear Dynamics, April 2009, Vol. 56-4, p. 381-387. DOI: https://dx.doi.org/10.1007/s11071-008-9405-8

[11] H. Dahmani, O. Pagés, and A. El Hajjaji. "Observer-based state feedback control for vehicle chassis stability in critical situations". IEEE Transactions on Control Systems Technology, Febuary 2016, Vol. 24-2, p. 636-644. DOI: https://dx.doi.org/10.1109/tcst.2015.2438191

[12] Li Y . "Simplified methods for the aseismic design of inelastic structure" [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003

[13] Li H, Liu M, Ou J P. "Negative stiffness characteristics of active and semi-active control systems for stay cables". Structural Control and Health Monitoring, July 2008, Vol. 15, p. 120-142. DOI: https://dx.doi.org/10.1002/stc.200

[14] Z. Zheng and M. Feroskhan. "Path following of a surface vessel with prescribed performance in the presence of input saturation and external disturbances". IEEE/ASME Trans. Mechatronics, June 2017, Vol. 22-6, p. 2564-2575. DOI: https://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2017.2756110

[15] R. Schere, S. L. Kalla, Y. Tang and J. Huang. "The Grünwald–Letnikov method for fractional differential equations". Computers & Mathematics with Applications, March 2010, Vol. 62-3, p. 902-917. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2011.03.054

[16] Zhong Z, Chen, Chong, Wei, Yanling, et al. " Fuzzy model-based decentralized robust piecewise static output feedback, control for discrete-time large-scale nonlinear systems". International Journal of General Systems, April 2017, Vol. 46-4, p. 1-26. DOI: https://dx.doi.org/10.1080/03081079.2017.1299149

[17] C. Hu, H. Jing, R. Wang, F. Yan, and M. Chadli. "Robust H∞ output feedback control for path following of autonomous ground vehicles". Mechanical Systems and Signal Processing, 2016. Vol. 70-71, p. 414-427. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.09.017

[18] Sui S, Tong S, Li Y. "Observer-based fuzzy adaptive prescribed performance tracking control for nonlinear stochastic systems with input saturation". Neurocomputing, 2015, Vol. 158, p. 100-108. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2015.01.063

[19] Kobayashi N, Kawase K, Sato S, et al. "Experimental verification on effects in an emergency stop by installation of magneto rheological fluid damper to an elevator". IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), April 2017. DOI: https:/dx. doi. org/10.1109/INTMAG.2017.8008043

[20] C. Wang and Y. Lin. "Adaptive dynamic surface control for MIMO non-linear time-varying systems with prescribed tracking performance" . International Journal of Control, April 2015, Vol. 88- 4, p. 832-843. DOI: https://dx.doi.org/10.1080/00207179.2014.981860

[21] Y. Huang, J. Na, X. Wu, and G. Gao. "Approximation-free control forvehicle active suspensions with hydraulic actuator". IEEE Transactions on Industrial Electronics. September 2018 Vol. 65- 9, p. 7258-7267. DOI: https://dx.doi.org/10.1109/TIE. 2018. 2798564

[22] C. Hua, J. Chen, Y. Li, and L. Li. "Adaptive prescribed performance control of half-car active suspension system with unknown dead-zone input ". Mechanical Systems and Signal Processing, March 2018, Vol. 111. p. 135-148. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.03.048

[23] C. Gorges, K. Öztürk, and R. Liebich. "Impact detection using a machine learning approach and experimental road roughness classification". Mechanical Systems and Signal Processing, July. 2019, Vol. 117, p. 738-756. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.07.043

[24] J. Zhao, P. K. Wong, Z. Xie, X. Ma, and X. Hua. "Design and control of an automotive variable hydraulic damper using cuckoo search optimized PID method". International Journal of Automotive Technology, January 2019, Vol. 20-1, p. 51-63. DOI: https://dx.doi.org/10.1007/s12239-019-0005-z

APPRECIATION

This study was funded by the Government Guiding Regional Science and Technology Development under Grand 2019L3009, the Scientific and Technological Projects of Fuzhou City under Grant No. 2019-G-49 , the Scientific and Technological Projects of Xiamen City under Grant No. 3502Z20179033, the Scientific Research Items of MJU under Grant No. MJY18003.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9362-1.pdf

- Los artículos deberán ser originales e inéditos y no deben de haber sido enviados simultaneamente a otros medios de comunicación.
- Tendrán siempre preferencia los que versen sobre temas relacionados con el objetivo, cobertura temática y/o lectores a los que se dirige la revista.
- Todos los trabajos serán redactados en castellano o inglés y deberán cumplir los siguientes requisitos:
  - Título en castellano e inglés de 150 caracteres máximo
  - Un breve resumen (Abstract), de unas 300 palabras, en castellano e inglés.
  - Entre tres y cinco palabras clave (Key words) en castellano e inglés, que permitan identificar la temática del artículo
  - No deberían de tener más de aproximadamente 5.500 palabras, o 17 páginas formato A4 en fuente Arial 10 con interlineado simple (Consultar con DYNA extensiones superiores).
  - Bibliografía relacionada o referencias según normas DYNA en www.revistadyna.com
- Con el objeto de facilitar la "revisión entre pares", el autor deberá asignar el código DYNA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo, seleccionándolo de entre los códigos disponibles en la dirección de Internet: www.revistadyna.com
- Los originales se remitirán mediante nuestra página web (envío artículos), en formatos .DOC (msword), .RTF, o .TXT. Se recomienda una calidad mínima de 300ppp para las fotografías que se adjunten con el artículo. Se harán constar: título del artículo, nombre del autor, título académico, empresa o institución a la que pertenece, dirección electrónica, dirección postal y teléfono.
- Se someterán al Consejo de Redacción cuantos artículos se reciban, realizándose la "revisión entre pares" por los expertos del Consejo o los que éste decida. El resultado de la evaluación será comunicado directamente a los autores. En caso de discrepancia, el editor someterá el trabajo a un revisor externo a la revista cuya decisión será trasladada nuevamente al autor.
- Los autores aceptan la corrección de textos y la revisión de estilo para mantener criterios de uniformidad de la revista.
- La revista se reserva el derecho de no acusar recibo de los trabajos que no se ajusten a estas normas.
- Para mayor detalle sobre estás normas, por favor visite nuestra web http://www.revistadyna.com (en el apartado de "autores y evaluadores").

- Paper will be original and unpublished and it must not be concurrently submitted for publication elsewhere.
- Preference will be given to articles on the main subject areas of the Journal.
- Papers should be written in Spanish or English and should fulfil the following requirements:
  - Title in both English and Spanish with a maximun length of 150 characters.
  - Brief Summary or Abstract, about 300 words, in Spanish and English.
  - Between three and five keywords in English and Spanish, that identify the paper theme.
  - Written text should not exceed 5.500 words, or 17 A4 format pages in 10 size arial font sigle-spaced (For longer lengths consult with DYNA)
  - Bibliographical references acording to DYNA norms at www.revistadyna.com
- To facilitate the "peer review" process, the author will assign the six digits DYNA code corresponding to the paper

thematic, selecting it between the codes available at the Internet address: www.revistadyna.com

- Papers should be sent by our web page (envío artículos), in .DOC (MSWord), .RTF, or .TXT format. It is recomended a minimum quality of 3000 ppp for the pictures enclosed in the article. These papers will include: Article title, author name, academic title, company or institution, email, correspondence address and telephone.
- All papers must pass the Editorial Board (EB) evaluation process. The "peer review" will be made by the Editorial experts or those that the EB decides. The evaluation result will be directly communicated to the author. In case of discrepancy, the publisher will refer the work to an external reviewer whose decision will again be transferred to the author.
- The authors accept the text correction and the style revision to maintain uniformity criteria for the magazine.
- The journal reserves the right not to accept articles which do not comply with said instructions.
- To find more details about these instructions, please visit our web page http://www.revistadyna.com (authors and referees section).

DYNA
Ingeniería e Industria

PROMOCIÓN: Suscripción a DYNA por 29,85 €/año

Reciba la revista dyna impresa en su domicilio por solo 29,85 €/año





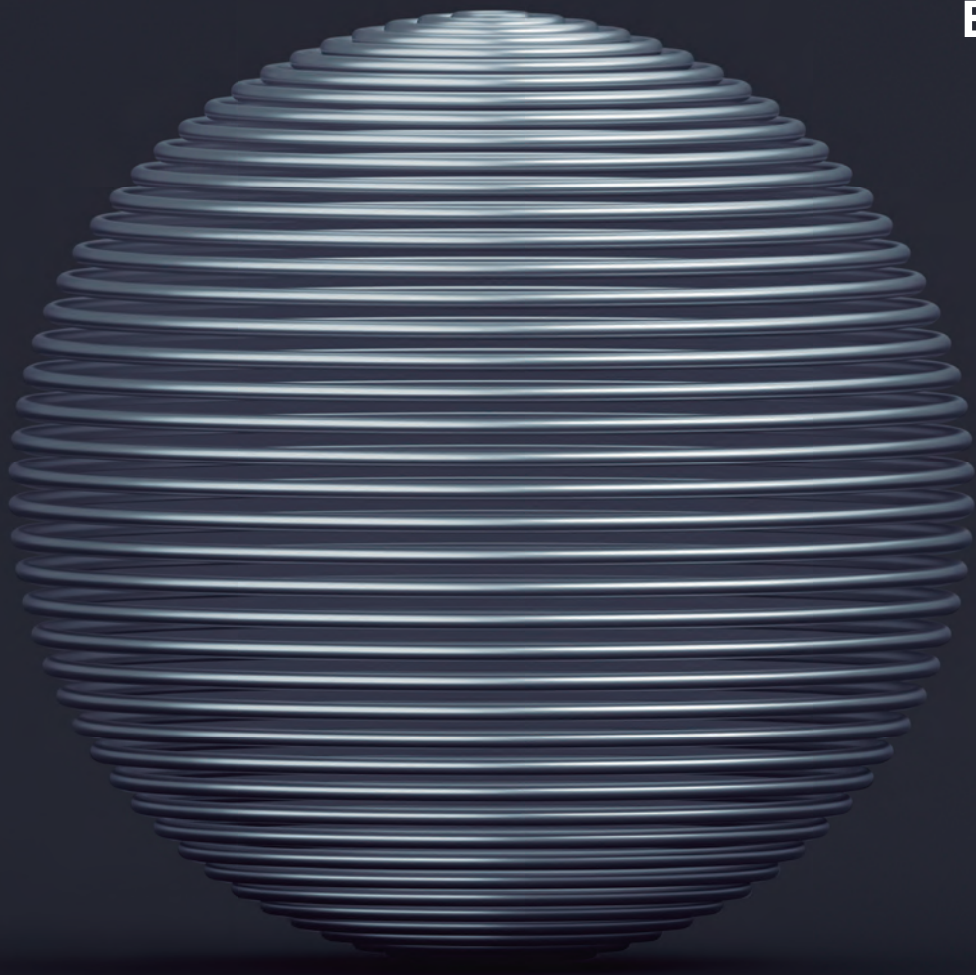
La revista DYNA ha llegado a un acuerdo de colaboración con algunos Colegios de Ingenieros Industriales para ofrecer a sus colegiados la revista impresa con un 35% de descuento.

Promoción válida para los Ingenieros Industriales colegiados en: Araba, Bizkaia y Galicia.

Si está interesado, envíe un email a **dyna@revistadyna.com** mencionando que se acoge a la promoción e indicando su nº de colegiado y el nombre de su Colegio de Ingenieros Industriales.

KNOW THE FUTURE

LA TECNOLOGÍA QUE CAMBIARÁ EL MUNDO



31 BIEMH

YOU MAKE IT BIG

Bilbao-Spain, 25-29 mayo 2020

Colaboran:

Euskadi, bien común

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

EKONOMIAREN GARAPEN ETA AZPIEGITURA SAILA
DEPARTAMENTO DE DESARROLLO ECONÓMICO E INFRAESTRUCTURAS

AiMHE
ASOCIACIÓN DE IMPORTADORES DE MÁQUINA - HERRAMIENTA

Organizan:

AFM Advanced Manufacturing Technologies

www.afm.es

BEC! BILBAO EXHIBITION CENTRE

EXPOSSIBLE!

www.biemh.com