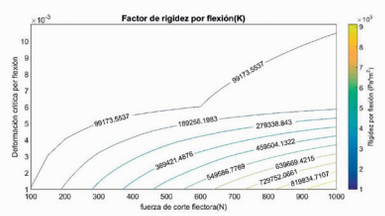
Un proceso robusto para el acabado en precisión de piezas fabricadas por impresión metálica



A robust process for the precision finishing of pieces originated by metallic printing

José-David Pérez-Ruiz, Silvia Martínez, Luis-Norberto López-de-la-Calle, Octavio Péreir,Haizea Gonzalez y Aitzol Lamikiz
Universidad del País Vasco. UPV/EHU. Dpto. Ingeniería Mecánica. Plaza Torres Quevedo, s/n - 48013 Bilbao(España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9382 | Recibido: 11/09/2019 • Inicio Evaluación: 17/09/2019 • Aceptado: 17/09/2019

ABSTRACT

- The additive manufacturing industry has developed significantly, which includes metal printing techniques; with a wide range of applications, great projections and future expectations. Technologies such as SLM or LMD have gone from being considered as a rapid prototyping process to consolidating in a primary manufacturing process.
  Despite the great advances made in metal printing, there are still aspects of quality, dimensional and finish that require the need for subsequent actions to metallic printing (thermal treatments, subtractive manufacturing) for the scope of structural integrity and dimensions definitive.
  This paper presents a methodology based on the robust design approach, which allows to integrate the main hybrid process with 4 support processes for the control of performance metrics and the mitigation of the effects of noise factors through the strategic use of the controllable factors under a predictive, preventive and technical approach.
  A case study is presented where the phase of the vibration control applied to a type of elbowed ducts is analyzed, which allows to obtain an adequate tendency of the type and location of fixation system that leads to improve the quality of the finishing.
- **Keywords:** SLM, machining, geometric distortion, dimensional control, heat treatment, robust design.

RESUMEN

La Industria de la fabricación aditiva se ha desarrollado de forma significativa, lo que incluye a las técnicas de impresión de metales; con un amplio rango de aplicaciones, grandes proyecciones y expectativas de futuro. Tecnologías como el SLM han pasado de considerarse como un proceso de obtención de prototipos rápidos a consolidarse en un proceso de fabricación primario.

A pesar de los grandes avances logrados en la impresión de metales, aún existen aspectos de calidad, dimensionales y de acabado que requieren de la aplicación de acciones posteriores a la impresión metálica (tratamientos térmicos, fabricación substractiva) para el alcance de propiedades y dimensiones definitivas.

Este trabajo presenta una metodología basada en el enfoque de diseño robusto, que permite integrar el proceso hibrido principal con 4 procesos de soporte para el control de las métricas de rendimiento y la mitigación de los efectos de los factores de ruido a través del uso estratégico de los factores controlables bajo un enfoque predictivo, preventivo y técnico.

Se presenta un caso de estudio donde se analiza la fase del control de vibración aplicada a una tipología de ductos acodados que permiten evidenciar una tendencia adecuada del tipo y ubicación del utillaje de apoyo que conlleva a mejorar la calidad del acabado en pieza.

Palabras clave: SLM, mecanizado, distorsión geométrica, control dimensional, tratamiento térmico, diseño robusto.

1. INTRODUCCIÓN

La impresión metálica ha creado un nuevo segmento en la fabricación de piezas de alta complejidad geométrica [1]. Técnicas de fabricación como SLM cada día son mejoradas, y abren la opción de producción industrial en lotes medianos y pequeños [2] [3]. Aspectos como la traslación directa del diseño al componente, fabricación de piezas huecas o con geometrías internas complejas, reducción en el tiempo de desarrollo de producto y manufactura, inserción en el mercado, y excelente escalabilidad [4][5] son potencialidades de esta nueva forma de fabricar.

La manufactura aditiva es pieza clave dentro de la industria 4.0, sin embargo hay dudas acerca de cómo podría utilizarse en entornos de fabricación de lotes grandes [6]. Es por esto que conceptos tales como a) tecnologías de grupo [7], b) manufactura flexible y c) células de producción cobran mucha importancia. La manufactura aditiva tiene multitud de retos aún por superar, que van desde la calidad y homogeneidad de los materiales antes y después del proceso de impresión, a cambios dimensionales y estructurales que sufren las piezas durante el proceso mismo [8]. La tecnología SLM suele presentar esfuerzos residuales y distorsiones geométricas [9], en algunos casos estas anomalías son mitigadas con la optimización de los parámetros de fabricación o el uso de soportes [10]. También se han hecho esfuerzos para monitorizar el proceso y detectar anomalías durante el mismo a través de técnicas de análisis de imagen [11][12][13]; pese al esfuerzo de investigación, se abre la necesidad de procesos posteriores que garanticen las dimensiones y propiedades deseadas en las piezas.

El tamaño reducido de algunas piezas impresas y las formas internas de las mismas suelen dificultar el proceso metrológico. la baja rigidez de las piezas, formas intrincadas y la naturaleza anisotrópica de los materiales impresos suelen tener influencia directa en las operaciones de mecanizado [14], algunas operaciones como el fresado o rectificado pueden producir esfuerzos residuales a compresión o marcas bajo la superficie [15][16]. Todo lo anterior lleva a la necesidad de plantearnos escenarios de multiproceso,de

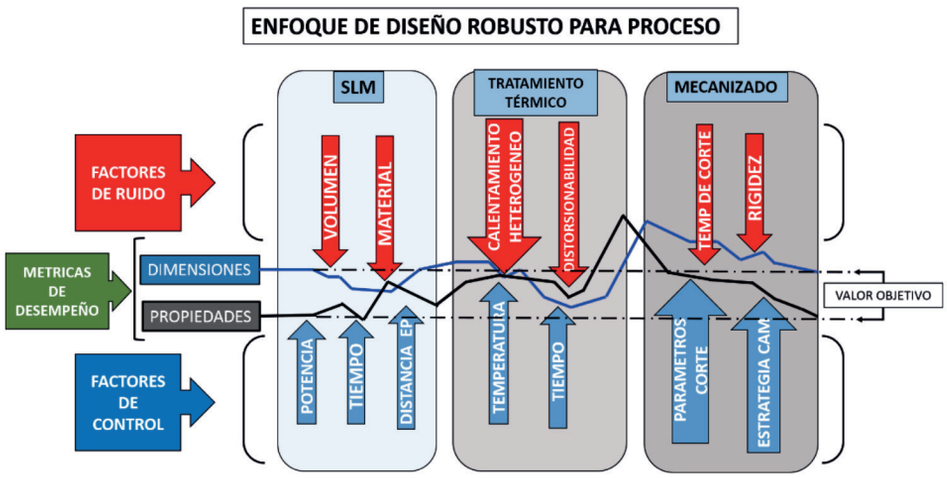


Figura 1: Enfoque de diseño robusto para proceso de obtención de piezas por impresión metálica

monitorización y control de diferentes variables en las distintas etapas del proceso. La obtención de una pieza impresa con utilidad industrial es entonces un proceso que requiere de la disminución de las desviaciones de las métricas de rendimiento para garantizar la calidad de los productos, lo que a su vez genera la necesidad de desarrollar una metodología que permita aportar robustez a un proceso que es altamente personalizado y complejo en virtud de obtener buenos niveles de repetibilidad.

El presente trabajo es una propuesta metodológica que facilita la obtención de partes con acabado superficial, dimensiones y propiedades dentro de los requerimientos de calidad. No se pretende ahondar en procesos específicos, tecnologías, materiales, o tipologías de forma particulares, sino brindar una visión holística del efecto de los factores que afectan cada etapa del proceso hibrido de fabricación SLM-TRATAMIENTO-MECANIZADO y el tratamiento de los mismos. Un aspecto importante de esta propuesta es que identifica 4 procesos de control necesarios para el logro de las métricas de desempeño y su interacción con el proceso principal y ofrece diagramas de flujo, gráficas, tablas de criterio y conceptos técnicos para toma de decisiones bajo un esquema predictivo, preventivo, correctivo y técnico. En la última sección se realiza un caso de estudio del pilar de control de vibración para una familia de ductos acodados, en donde se siguen los pasos de la metodología propuesta y se analizan diferentes configuraciones de soportes por utillaje para la mitigación del desplazamiento debido a la vibración.

2. CONCEPTUALIZACIÓN Y METODOLOGÍA

La robustez de un proceso industrial puede definirse como la capacidad de un sistema de producción de mantener sus variables de rendimiento de proceso dentro de los valores de tolerancia, aun cuando el sistema reciba perturbaciones debidas a condiciones propias o externas al proceso en sí. Es conocido entonces que un proceso industrial es tan robusto como lo es cada una de sus etapas y de manera análoga como lo es el diseño del producto en sí.

El diseño robusto de Taguchi, es un método para el desarrollo de un producto que busca la mayor estabilidad en las variables del desempeño del mismo, bajo una amplia variedad de condiciones de operación o experimentación. Este método persigue principalmente la identificación de los factores de control, y de ruido y sus interacciones y su influencia como efectos en las respuestas del proceso, así como la definición correcta de las métricas de rendimiento.[17

La figura 1 presenta un esquema que enmarca el proceso hibrido dentro del enfoque de diseño robusto.

2.1. FACTORES DE CONTROL, DE RUIDO Y METRICAS DE RENDIMIENTO

Las métricas de rendimiento se escogen según los requerimientos más importantes del cliente y del fabricante. Los aspectos

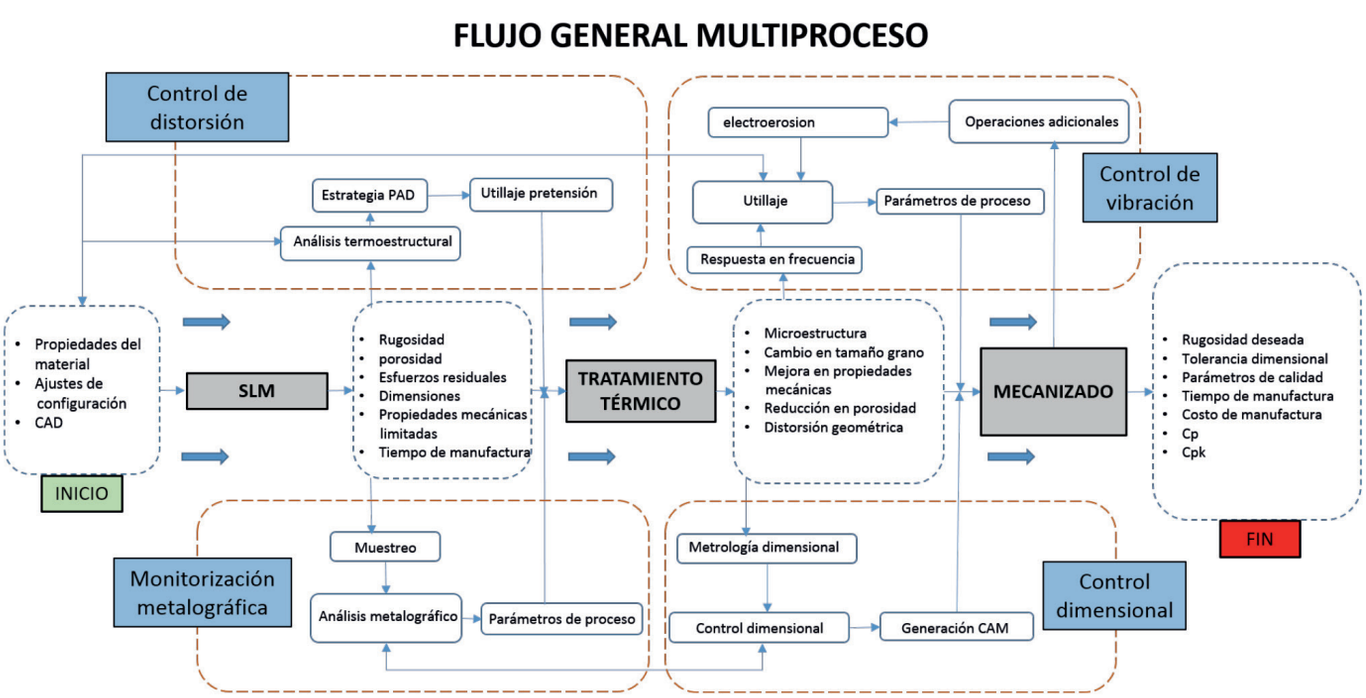


Figura 2: Proceso de fabricación principal y procesos de soporte

de calidad y de economía toman entonces un valor central dentro del interés común. La tabla 1(ver Material suplementario) presenta un resumen de los principales factores de control y de ruido, así como las **métricas de rendimiento.** [18] [19]. La columna 1 de la tabla 1 presenta los factores de control, de ruido y las métricas para cada etapa del proceso, la columna 2 llamada 'TIPO' clasifica los factores de la columna 1 en controlables, de ruido o en métricas de rendimiento. Las columnas 3,4 y 5 permiten establecer a que parte del proceso hibrido afectan los diferentes factores o métricas de rendimiento. La columna 6 da explicaciones acerca del significado de los distintos factores o métricas de rendimiento.

2.2. PROCESO PRINCIPAL Y PROCESOS DE SOPORTE

Además de la comprensión de las etapas principales del proceso, es importante contar con estrategias que permitan la gestión sistemática de los factores de control, la interacción del proceso principal con acciones de soporte y la consecución de los objetivos de estabilidad en las métricas de rendimiento.

La figura 2 muestra el resultado de aplicar el diseño robusto al proceso hibrido STM(SLM-TRATAMIENTO-MECANIZADO) en base a los factores y métricas definidos en la tabla 1. El proceso principal se encuentra en la zona central y los 4 procesos de soporte en la periferia interrelacionados a lo largo de la cadena de fabricación, así como las interacciones entre los mismos. Los procesos de soporte tienen un enfoque preventivo y predictivo, buscando disminuir el efecto de los factores de ruido y creando configuraciones activas y pasivas que favorezcan el cumplimiento de los objetivos de calidad de la pieza fabricada.

2.2.1. MONITORIZACIÓN METALOGRÁFICA

Los esfuerzos residuales en el material antes del tratamiento térmico son la principal razón para la distorsión por alabeo de las piezas esbeltas durante y después del tratamiento térmico. Esta condición en el material hace que la labor de predicción de la dirección de distorsión sea difícil de controlar.

La mayoría de los esfuerzos residuales que se tienen en cuenta en los procesos de diseño de pieza, son los esfuerzos residuales de largo rango o macro. Sin embargo los esfuerzos residuales de segundo orden también llamados esfuerzos micro-residuales son a menudo no evaluados o atendidos. [20]

En el proceso hibrido de impresión-tratamiento-mecanizado, hay un lapso entre la finalización de la impresión y antes del tratamiento **térmico** que permite hacer un muestreo metalográfico, este muestreo puede entregar información valiosa acerca de precipitados finos como la martensita, vacancias, dislocaciones, entre otras. Información que es importante para ajustar los parámetros del tratamiento térmico y la estrategia de control de distorsión. [21]

2.2.2. CONTROL DIMENSIONAL

El control dimensional es fundamental para alcanzar los objetivos y cuenta con dos fases, Una fase previa al mecanizado, y una fase posterior al mecanizado. En la fase previa al mecanizado es necesario contar con un modelo CAD en 3D de la pieza después del tratamiento térmico y para esto es necesario el uso de tecnología de medición dimensional en 3D apropiada, La figura 9(ver material suplementario) muestra una comparación de diferentes tecnologías para la medición en 3D de piezas[22][23][24][25] bajo 3 grupos principales de evaluación: Tipo de forma, desempeño, y tamaño de pieza. En el caso de piezas pequeñas y delgadas que puedan ser desmontadas de la placa base, la mejor alternativa es la tomografía computarizada, La cual es también la única tecnología que permite conocer las dimensiones de formas internas, sin embargo el nivel de incertidumbre de la tomografía computarizada es inferior al de los equipos tipo CMM[26] (CT, de manera adicional en el caso de piezas de tamaño medio o grande sin formas internas o zonas muy intrincadas, la mejor opción es la sonda táctil de 5 ejes. Las tecnologías de luz estructurada(luz blanca o azul) y el escáner laser son también excelentes opciones para determinadas configuraciones de pieza, siendo la luz estruc-

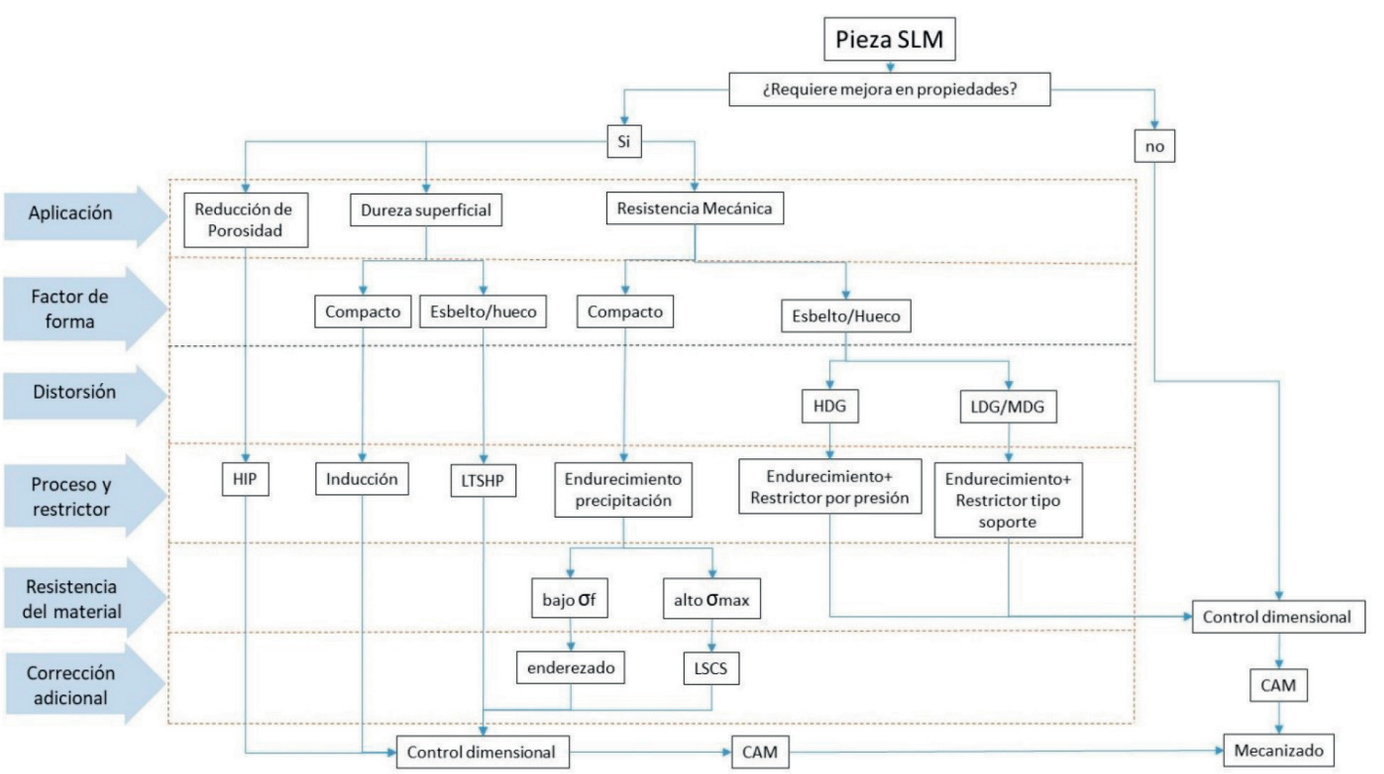


Figura 3: Criterios para el control de distorsión

turada un poco más versátil que el escáner laser, con la limitación de las superficies brillantes, requiriéndose el uso de aplicación de spray especial sobre algunos tipos de superficie. En relación con la velocidad de medición, la tecnología de escáner laser es más rápida que la luz estructurada.

Adicional a la evaluación dimensional, es también de suma importancia la valoración de la superficie, para este fin hay diferentes técnicas que permiten evaluar la calidad de la topografía superficial de las piezas dentro de las que se destacan la microscopia confocal, microscopia confocal cromática, La medición de rugosidad y perfilado, interferometría, sensado elastomérico, entre otras.[27]

2.2.3. CONTROL DE DISTORSIÓN

Las tensiones residuales son una realidad en las piezas impresas por SLM y estas son causantes directas de las distorsiones geométricas, pese a que el proceso de SLM genera niveles de distorsión geométrica que son significativos para piezas de baja rigidez[28], es el proceso de tratamiento térmico el que suele producir las mayores desviaciones en la forma de la pieza, se generan modificaciones en la microestructura, dureza y se inducen nuevos esfuerzos residuales lo que afecta el grado de precisión de las pieza.[29]

La figura 3 muestra la estrategia del proceso de control de distorsión representada en un diagrama de flujo. En este diagrama se identifican las siguientes etapas:

Mejora en propiedades mecánicas: se refiere a la evaluación del producto respecto a si necesita mejorar sus propiedades respecto al estado después de impresión.

Aplicación: Es el tipo de mejora que requiere la pieza, puede ser reducción de porosidad, dureza superficial o mejora de propiedades mecánicas entre otras.

Factor de forma: aquí se determina si la pieza se considera esbelta, hueca o compacta. El tipo de forma es de suma importancia para seleccionar el tratamiento térmico recomendado que incluya el control de distorsión. Se recomiendan procesos como el HIP(Hot isostatic Pressing) para reducción de porosidad[30], LTSHP(low temperature surface hardening process) [31] para piezas esbeltas, etc.

Grado de distorsionabilidad: Es un indicador de la sensibilidad o predisposición de una geometría a distorsionarse por acción del tratamiento térmico, esta sensibilidad o grado de distorsionabilidad de la pieza es mayor en piezas con ranuras, cuñas, cambios bruscos de sección entre otros.

Proceso y tipo de restrictor: en esta etapa se selecciona el tratamiento térmico recomendado para la aplicación. En el caso de piezas esbeltas se recomienda el uso adicional de restrictores de presi**ón generalizada sobre la pieza** para partes con alto grado de distorsionabilidad denominadas como HDG(High Distortion Degree) [32], o restricciones de desplazamiento del tipo tensor pasivo para formas con menor distorsionabilidad[21]. En estos casos de piezas esbeltas se hace necesario entonces el análisis previo termo-estructural para determinar las tendencias de deformación de la pieza y definir el diseño de los restrictores.

Resistencia de material: hace referencia al esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo del material

Corrección adicional: Hace referencia a los procesos de enderezado posteriores para piezas compactas. Los cuales deben ser cuidadosamente controlados en el caso de piezas con mucha rigidez y resistencia.[33]

La figura 10 (ver material suplementario) muestra el comparativo de 2 estrategias para el control de la distorsión geométrica. En la estrategia correctiva las distorsiones acumuladas en los procesos de SLM y tratamiento térmico son corregidas en el mecanizado, teniendo en cuenta que la pieza fue concebida desde el CAD con exceso dimensional para que el proceso de mecanizado sea viable. Este proceso es recomendable para lotes pequeños donde la pieza se obtenga en corto tiempo. Posee la desventaja de generar más desperdicio de material, de herramientas y tiempo de mecanizado.

Por otro lado la estrategia preventiva-correctiva incluye el uso de elementos restrictores de la distorsión en tiempo real durante el proceso de tratamiento térmico. Es recomendable para lotes medianos o grandes. Tiene como ventajas menor tiempo de mecanizado, menos material retirado y menor desgaste de herramienta.

2.2.4. CONTROL DE VIBRACIÓN

Las formas con voladizos y/o paredes delgadas generan dificultades para el mecanizado, en algunas aplicaciones como es el caso de partes aeronáuticas, el uso de sistemas de fijación como apoyo a la acción de mecanizado es fundamental, sin embargo el cambio de respuesta dinámica en el material a causa de los cambios de espesor y ubicación de la herramienta pueden llevar a la necesidad de optimizar la posición de los soportes del sistema de fijación para mantener los valores de fuerza[34] y desplazamiento dentro de niveles tolerables[35]. esta tarea implica la necesidad de modelos mecanisticos[36], evaluación de estrategias CAM y de modelos de vibración para el tipo de geometría analizada[37].

Existen sistemas de fijación inteligente que tienen la capacidad de adaptarse en tiempo real a las necesidades del mecanizado, identificando las necesidades de rigidez de la pieza y ajustando la relación de amortiguación y elasticidad para mantener dimensiones y fuerzas de corte dentro de los valores objetivo [38].

La figura 4 presenta un diagrama de flujo para el proceso de control de vibración en pieza por acción del mecanizado, no incluye estrategias para el control del chatter, para el cual se recomiendan estrategias robustas como el RCPM(Robust Chatter prediction in milling)[39]. la medición de fuerzas de corte es incluida dentro de la predicción de los coeficientes mecanisticos.

El enfoque propuesto permite evaluar condiciones de resonancia y desplazamientos significativos en piezas con geometrías regulares por acción de cargas armónicas generadas los procesos de corte a través del análisis de cargas instantáneas en puntos críticos.

A continuación se detallan los pasos para la fase de control de vibración:

Nivel de rigidez de la pieza: se hace necesario estimar la constante de rigidez geométrica para flexión en voladizo (K), [40].

$$K = \frac{3*E*I}{L^2} \quad (1)$$

Donde:
K= Factor de rigidez a flexión
E: módulo de elasticidad del material
I: momento de inercia
L: longitud equivalente de viga

Las piezas impresas por SLM con formas esbeltas pueden poseer una tipología similar a una viga empotrada en voladizo, por lo tanto en este primer filtro se busca determinar si la pieza impresa puede considerarse rígida y compacta, o esbelta y flexible. En el caso de piezas con formas muy complejas y dificultad para definir tipología esbelta, se recomienda asumir que hay flexibilidad y pasar al siguiente paso de evaluación. la figura 5 presentan curvas

correspondientes a valores de rigidez geométricas mínimos para considerarse un cuerpo como rígido. Siendo rígido cuando el valor de la rigidez calculada supere el valor obtenido en la gráfica para una combinación definida de fuerza de corte flectora y deformación considerada como crítica.

Parametrización geométrica: En este paso se identifican dimensiones que dan lugar a la tipología de forma de la pieza

ANOVA: en esta etapa se determinan los parámetros geométricos significativos sobre la frecuencia natural

Análisis Modal: consiste en hacer un barrido de frecuencias naturales y armónicas para una gama de tamaños de piezas

Mapeo de Frecuencias de excitación: este mapa basado en las características de la herramienta y velocidad de en conjunto con los datos del análisis modal permiten calcular el FEXN ratio,

$$FEXN\ ratio = \frac{frecuencia\ natural}{frecuencia\ excitación} \quad (2)$$

Para FEXN ratio mayor a 2 se puede pasar al mecanizado sin utillaje adicional. Para FEXN-ratio menor a 2, se hace necesario el uso de utillaje adicional para el amarre de la pieza.

Análisis de respuesta por frecuencia: Para realizar el análisis de respuesta en frecuencia se requiere conocer el factor de amortiguamiento de la pieza y la predicción de fuerzas de corte por modelo mecanisticos en las zonas críticas. El diseño apropiado del utillaje según la tipología de formas, requiere de un proceso que incluya conceptos de función de calidad y diseño para manufactura(DFM), diseño de experimentos para determinar la relación binaria elasticidad-amortiguamiento óptima del utillaje. El CAD original debe ser modificado para que la pieza a imprimir cuente con los amarres necesarios donde el utillaje haga anclaje. La sección 3 presenta un caso de estudio donde se aplica la metodología del proceso de control de vibración a un tubo acodado.

3. CASO DE ESTUDIO

Con el fin de aplicar la metodología propuesta, se ha realizado un caso de estudio para el proceso de control de vibración por acción de fresado en la tipología de ductos acodados. La figura 6b muestra un ducto acodado impreso en una maquina Renishaw 400 del CFFA (Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica). Esta tipología de forma tiene características como el voladizo, pared delgada, formas huecas, entre otras que generan baja rigidez geométrica y facilitan la generación de vibración por acción de las fuerzas de corte.



Figura 5: Factor de rigidez por flexión debido a fuerzas de corte

al comprobar que la pieza corresponde a un cuerpo flexible según la figura 5, se realizó *la parametrización geométrica, v*er figura 6a, Para este caso en particular se seleccionaron 6 parámetros geométricos. Un ANOVA con diseño de cribado 2^6 fue desarrollado para obtener los parámeros significativos. Los resultados del ANOVA determinaron que solo la longitud de voladizo, diámetro y espesor son significativos. Posteriormente se realizó el análisis modal para determinar los frecuencias naturales en ductos para longitudes de 100 a 160mm y espesores de 1 a 2.2 mm, con diámetro interno de 30 mm. La figura 6.c muestra las frecuencias de excitación para diferentes diámetros y velocidades de corte con una fresa de 4 hilos, donde aparecen zonas de resonancia cuya información proviene del análisis modal. Estas zonas permiten determinar combinaciones de diámetros de herramienta y velocidad de corte donde el FEXN-ratio es igual a uno 1.

Este análisis preliminar revela la necesidad de implementar acciones para aumentar la rigidez de la pieza y por ende la frecuen-

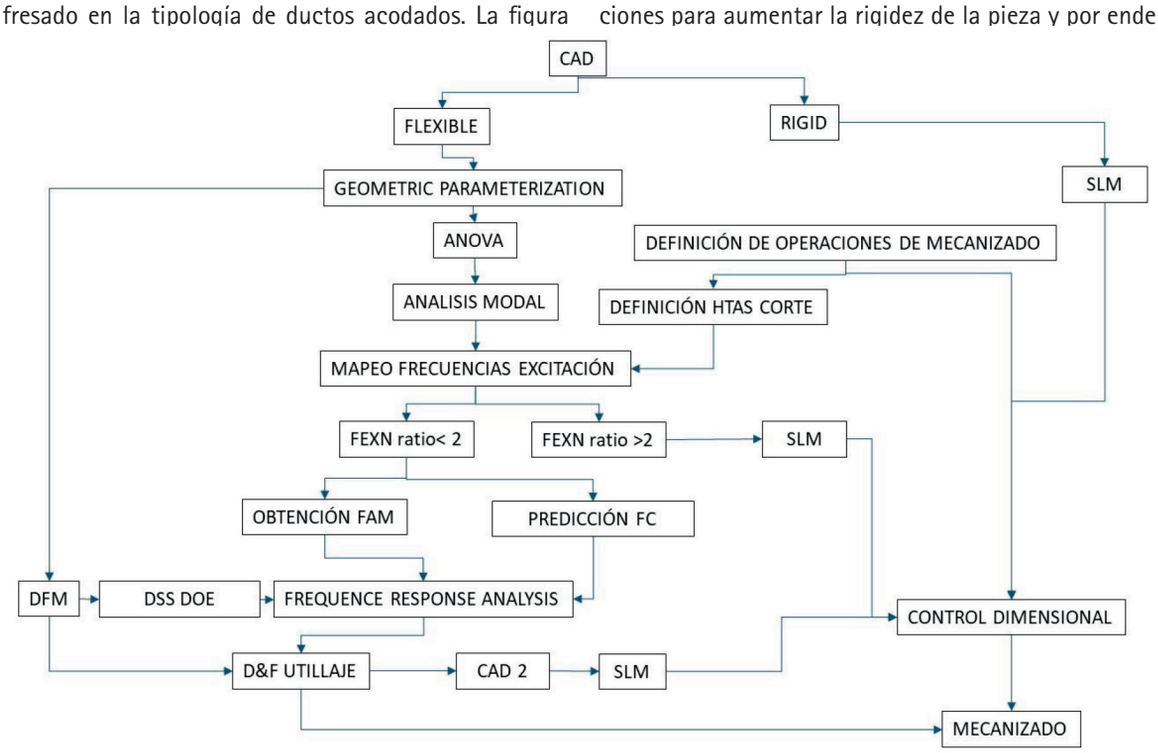


Figura 4: Diagrama de flujo para control de vibración por mecanizado

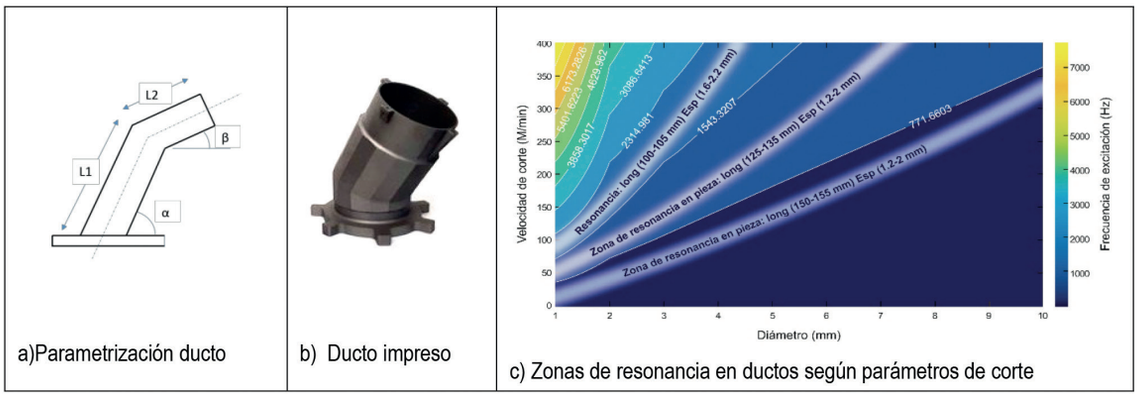


Figura 6: Etapas previas a análisis de respuesta en frecuencia

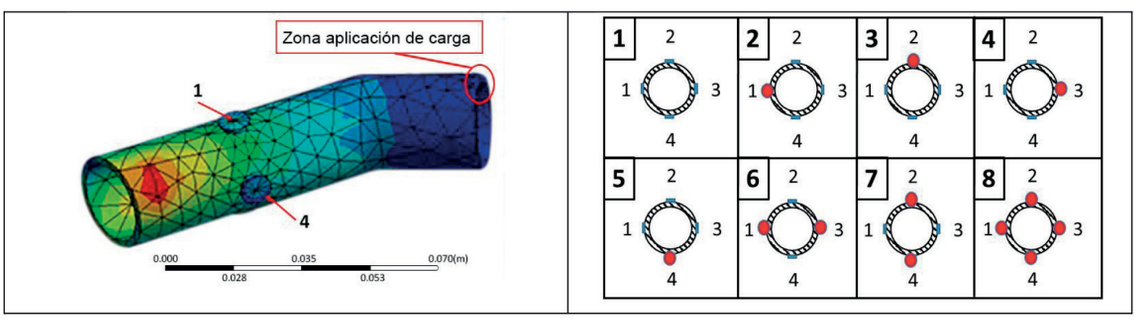


Figura 7: Configuraciones de apoyos en ducto para evaluación de niveles de esfuerzo y vibración

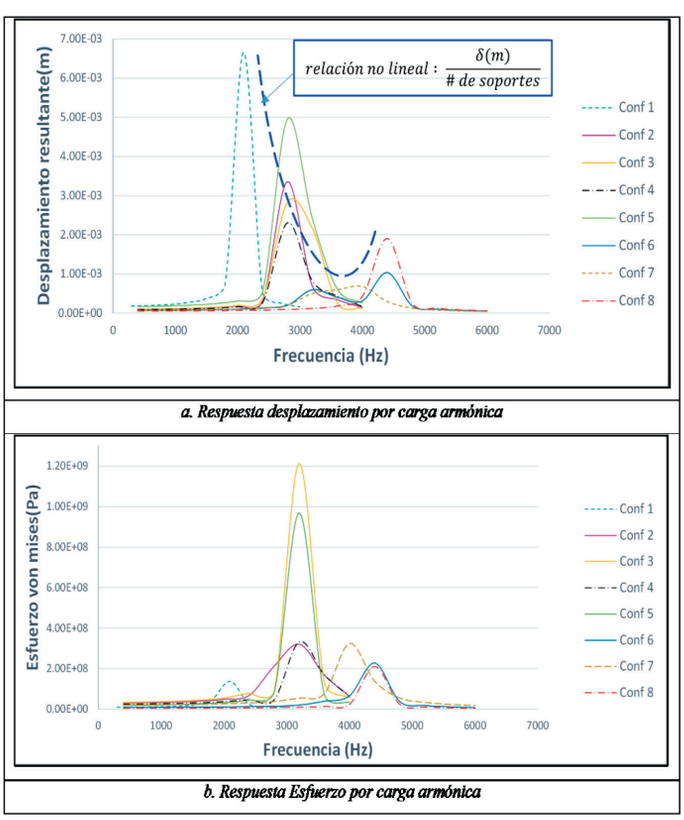


Figura 8: Respuesta en desplazamiento y esfuerzo por carga armónica

cia natural del sistema, lo que justifica entonces las siguientes etapas del proceso.

La siguiente etapa del análisis consiste en obtener la configuración óptima de los apoyos en relación al efecto sobre las variables de respuesta. Se hace necesario entonces evaluar la forma de los mismos, su ubicación, el número de ellos y la relación amortiguamiento-rigidez, En este caso las variables de respuesta son el desplazamiento en la zona de mecanizado y los esfuerzos en la zona aledaña al punto de fijación de los apoyos o amarres. Para el análisis de respuesta de desplazamiento y esfuerzos por acción de cargas armónicas como las de mecanizado, se analizó un tubo acodado de 2 mm de espesor, 70 mm de longitud L1 y diámetro interno de 30mm. Se colocaron 4 puntos de control para los soportes como se aprecia en la figura 7 y se analizaron 8 configuraciones de posición de los apoyos con el software ANSYS®. El material utilizado es acero estructural con factor de amortiguamiento 0.01. los resultados del análisis de respuesta en frecuencia se presentan en la figura 8 y son analizados en la sección 4.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este apartado resume las conclusiones del trabajo realizado respecto a la valoración de la metodología y observaciones relevantes del caso de estudio:

- La metodología propuesta permite la aplicación de un enfoque integral para la mitigación de los efectos de os factores de ruido, y la estabilidad de las métricas de rendimiento, basándose en la filosofía de diseño robusto aplicada al proceso hibrido SLM-TT-MECANIZADO.
- Los resultados obtenidos en el caso de estudio muestran que la metodología aplicada permitió identificar condiciones críticas para el proceso de mecanizado y trazar estrategias para el alcance de los objetivos.
- Los procesos de mecanizado que inducen importantes cargas armónicas como es el caso del fresado, pueden no ser la mejor opción para los procesos de acabado en paredes delgadas o voladizos, siendo importante evaluar la viabilidad de procesos alternos como el SAM(super abrasive machining)
- Las bajas frecuencias naturales características de los ductos o externals hacen que el uso de sistemas de refuerzo estructural del tipo soporte, clamping, mordazas adicionales u otro sea de gran importancia con el fin de aumentar la rigidez del sistema y distanciar la frecuencia natural de las frecuencias típicas de excitación.
- Las simulaciones realizadas permitieron establecer que el uso de soportes mejoró los niveles de rigidez de la pieza dentro de los valores deseados, aunque el nivel de esfuerzos se incrementó respecto al estado inicial. las configuraciones con un solo punto de apoyo no resultaron eficaces, siendo mejores las configuraciones 6 a 8.

- Los desplazamientos en la zona de mecanizado muestran un comportamiento no lineal en relación al número de soportes. entre cero y 2 soportes se ve una relación lineal inversamente proporcional entre el desplazamiento y numero de soportes, pero cuando se usan 4 soportes la tendencia se cambia y los desplazamientos aumentan, esto va en contra de la creencia de que a mayor rigidez menor desplazamiento y tiene su explicación en que el exceso de restricción que generan los 4 apoyos hace que toda la vibración generada se asumida prácticamente por la sección superior del ducto y no se aproveche el efecto de pivote que distribuye la vibración en las dos secciones del ducto debida a los armónicos de segundo y tercer orden.
- Los niveles de desplazamiento cuando se utiliza la configuración 6 o 7 son los más bajos y muy similares entre sí, sin embargo la configuración 6 tiene un mayor valor de frecuencia natural y por ende de rigidez,
- La configuración 8 presenta los menores esfuerzos, esto gracias a una mejor distribución de la carga, sin embargo son muy similares a los niveles de esfuerzo de la configuración 6
- La metodología aplicada al análisis ha permitido identificar la importancia de la rigidez geométrica como un factor determinante en el equilibrio entre disminución de esfuerzos y desplazamientos. Siendo la configuración 6 la más óptima en la relación esfuerzo-desplazamiento. Esta configuración también facilita la distribución de los ductos en la placa base para un mejor aprovechamiento del espacio durante la impresión.
- Las estrategias planteadas y los resultados obtenidos representan una base para el diseño y fabricación de utillajes para control de distorsión y vibración. Y permiten acotar la cantidad de condiciones experimentales para la obtención del diseño *óptimo del mismo.*

REFERENCIAS

[1] C. Klahn, B. Leutenecker, and M. Meboldt, "Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing," Procedia CIRP, vol. 36, pp. 230–235, Jan. 2015. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.082
[2] S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," J. Clean. Prod., vol. 137, pp. 1573–1587, Nov. 2016. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150
[3] W. Gao et al., "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering," Comput. Des., vol. 69, pp. 65–89, Dec. 2015. https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001
[4] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, and C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," Mater. Today, vol. 21, no. 1, pp. 22–37, Jan. 2018. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001
[5] M. K. Thompson et al., "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," CIRP Ann., vol. 65, no. 2, pp. 737–760, Jan. 2016. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004
[6] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, "The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0," Procedia Manuf., vol. 11, pp. 545–554, Jan. 2017. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148
[7] C. Mosier and L. Taube, "The facets of group technology and their impacts on implementation—A state-of-the-art survey," Omega, vol. 13, no. 5, pp. 381–391, Jan. 1985. https://doi.org/10.1016/0305-0483(85)90066-0
[8] T. Mukherjee, W. Zhang, and T. DebRoy, "An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing," Comput. Mater. Sci., vol. 126, pp. 360–372, Jan. 2017. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2016.10.003
[9] A. Kromm, G. Bruno, T. Thiede, S. Cabeza, N. Nadammal, and T. Mishurova, "Residual Stresses in Selective Laser Melted Samples of a Nickel Based Superalloy," in Materials Research Proceedings, 2018, vol. 6, pp. 259–264. http://dx.doi.org/10.21741/9781945291890-41
[10] T. Mishurova et al., "The Influence of the Support Structure on Residual Stress and Distortion in SLM Inconel 718 Parts," Metall. Mater. Trans. A, vol. 49, no. 7, pp. 3038–3046, Jul. 2018. https://doi.org/10.1007/s11661-018-4653-9
[11] L. Scime and J. Beuth, "Anomaly detection and classification in a laser powder bed additive manufacturing process using a trained computer vision algorithm," Addit. Manuf., vol. 19, pp. 114–126, Jan. 2018. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.009
[12] P. Lott, H. Schleifenbaum, W. Meiners, K. Wissenbach, C. Hinke, and J. Bültmann, "Design of an Optical system for the In Situ Process Monitoring of Selective Laser Melting (SLM)," Phys. Procedia, vol. 12, pp. 683–690, Jan. 2011. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.085
[13] S. K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R. K. Leach, and A. T. Clare, "Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing," Mater. Des., vol. 95, pp. 431–445, Apr. 2016. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.099
[14] M. Ni et al., "Anisotropic tensile behavior of in situ precipitation strengthened Inconel 718 fabricated by additive manufacturing," Mater. Sci. Eng. A, vol. 701, pp. 344–351, Jul. 2017. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.098
[15] J. Guo, M. Goh, Z. Zhu, X. Lee, M. L. S. Nai, and J. Wei, "On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi high-entropy alloy," Mater. Des., vol. 153, pp. 211–220, Sep. 2018. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.012
[16] D. Brown, C. Li, Z. Y. Liu, X. Y. Fang, and Y. B. Guo, "Surface integrity of Inconel 718 by hybrid selective laser melting and milling," Virtual Phys. Prototyp., vol. 13, no. 1, pp. 26–31, Jan. 2018.
[17] T. Pyzdek and P. A. (Paul A. Keller, Quality engineering handbook. Marcel Dekker, 2003.
[18] S. Berumen, F. Bechmann, S. Lindner, J.-P. Kruth, and T. Craeghs, "Quality control of laser- and powder bed-based Additive Manufacturing (AM) technologies," Phys. Procedia, vol. 5, pp. 617–622, 2010. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.089
[19] G. Le Coz and D. Dudzinski, "Temperature variation in the workpiece and in the cutting tool when dry milling Inconel 718," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 74, no. 5–8, pp. 1133–1139, Sep. 2014. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6006-1
[20] D. V. Doane, J. S. Kirkaldy, M. S. of AIME. Heat Treatment Committee, and A. S. for Metals. Activity on Phase Transformations, Hardenability concepts with applications to steel: proceedings of a symposium held at the Sheraton-Chicago Hotel, October 24-26, 1977. Metallurgical Society of AIME, 1978.
[21] A. Kumar Sinha, "Defects and Distortion in Heat-Treated Parts," in ASM HEAT TREATMENT HANDBOOK, 1991, pp. 601–619.
[22] "Scanning vs. CMM...a Short Comparison of Technologies." [Online]. Available: http://bernardandcompany.com/scanning-vs-cmma-short-comparison-of-technologies/. [Accessed: 01-May-2019].
[23] "Mitutoyo America Corporation - Precision Metrology Solutions." [Online]. Available: https://www.mitutoyo.com/. [Accessed: 01-May-2019].
[24] B. Gapinski, M. Wieczorowski, L. Marciniak-Podsadna, B. Dybala, and G. Ziolkowski, "Comparison of Different Method of Measurement Geometry Using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D," Procedia Eng., vol. 69, pp. 255–262, Jan. 2014. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.230
[25] "CT Scanning vs. White Light Scanning vs. Laser Scanning | Wenzel America," 2015. [Online]. Available: https://www.wenzelamerica.com/ct-scanning-vs-white-light-scanning-vs-laser-scanning/. [Accessed: 01-May-2019].
[26] P. Shah, R. Racasan, and P. Bills, "Comparison of different additive manufacturing methods using computed tomography," Case Stud. Nondestruct. Test. Eval., vol. 6, pp. 69–78, Nov. 2016. https://doi.org/10.1016/j.csndt.2016.05.008
[27] A. Townsend, N. Senin, L. Blunt, R. K. Leach, and J. S. Taylor, "Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review," Precis. Eng., vol. 46, pp. 34–47, Oct. 2016. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001
[28] B. Vrancken, "Study of Residual Stresses in Selective Laser Melting - KU Leuven," Leuven university, 2016.
[29] M. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Strojarski fakultet, I. Sveuč ilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Elektrotehnički fakultet, R. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Gračevinski fakultet Osijek, D. Kozak, and R. Konderla, DEFORMATIONS AFTER HEAT TREATMENT AND THEIR INFLUENCE ON CUTTING PROCE, vol. 18, no. 4. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Elektrotehnički fakultet u Osijeku, Gračevinski fakultet u Osijeku, 2011.
[30] W. Tillmann, C. Schaak, J. Nellesen, M. Schaper, M. E. Aydinöz, and K.-P. Hoyer, "Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting," Addit. Manuf., vol. 13, pp. 93–102, Jan. 2017. https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.006
[31] ASM International. Handbook Committee., ASM handbook. .
[32] G. E. Totten, Steel heat treatment : equipment and process design. Taylor & Francis, 2007.
[33] K.-E. Thelning, Steel and its heat treatment. Butterworths, 1984.
[34] B. Tukora and T. Szalay, "Real-time determination of cutting force coefficients without cutting geometry restriction," Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 51, no. 12, pp. 871–879, Dec. 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.08.003
[35] L. N. L. de Lacalle, A. Lamikiz, J. A. Sánchez, and I. F. de Bustos, "Recording of real cutting forces along the milling of complex parts," Mechatronics, vol. 16, no. 1, pp. 21–32, Feb. 2006. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2005.09.001
[36] O. B. Adetoro and P. H. Wen, "Prediction of mechanistic cutting force coefficients using ALE formulation," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 46, no. 1–4, pp. 79–90, Jan. 2010. https://doi.org/10.1007/s00170-009-2079-7
[37] M. Meshreki, "Dynamics of Thin-Walled Aerospace Structures for Fixture Design in Multi-axis Milling," 2009.
[38] H.-C. Möhring and P. Wiederkehr, "Intelligent Fixtures for High Performance Machining," Procedia CIRP, vol. 46, pp. 383–390, Jan. 2016. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.042
[39] G. Totis, "RCPM—A new method for robust chatter prediction in milling," Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 49, no. 3–4, pp. 273–284, Mar. 2009.
[40] J. M. Gere and S. Timoshenko, Mechanics of materials. PWS Pub Co, 1997.

MATERIAL ADICIONAL

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9382-1.pdf