

Método integrado asistido por ordenador para el desarrollo efectivo de procesos de soldadura robótica en el montaje de chasis de automóviles

Computer-aided integrated method for effective development of robotic welding processes of car chassis assembly

David Panari, Fabio Pini y Francesco Leali
Università di Modena e Reggio Emilia
Via Università, 4 - 41121 Modena (Italia)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8898>

1. INTRODUCCIÓN

Los chasis de automoción son conjuntos muy complejos compuestos por varias piezas (componentes individuales y subensamblajes) unidos por mediante tecnologías de soldadura [1]. Consecuentemente, con el objetivo de conseguir rendimientos óptimos en la soldadura, es importante que los parámetros de soldadura se ajusten correctamente [2]. Por esta razón los sistemas robóticos se han preferido sobre los procesos manuales [3]. Como demostración, la industria del automóvil ha impulsado la investigación al desarrollo de soluciones de soldadura flexibles y fue el primer campo en el uso intensivo de robots industriales en los procesos de producción [4].

En la actualidad, el proceso de desarrollo de nuevos productos sigue estrategias sistemáticas bien definidas basadas en bucles y en fases de diseño consecutivas que implican el uso de herramientas [5, 6] específicas asistidas por ordenador, con el objetivo de definir los requisitos funcionales, estéticos, de fabricación, económicos y cualitativos [7, 8, 9, 10]. Estas metodologías de diseño tienen en cuenta únicamente el diseño de las piezas y su análisis de tolerancias [11, 12, 13, 14]. La evaluación del tamaño final del ensamblaje y las distorsiones asociadas al proceso de soldadura se definen habitualmente en una fase de diseño posterior y para casos sencillos del tipo de unión de soldadura como las uniones tipo overlap, butt y tee [15, 16, 17]. Sin embargo los efec-

tos de las fases del proceso de producción sobre el producto fabricado no se tienen en cuenta por la ausencia de métodos de diseño capaces de evaluar cómo los requisitos de diseño afectan a las distorsiones causadas por los procesos de soldadura robóticas. Como validación, esa relación habitualmente se define y ajusta en una fase de optimización en planta, lo cual implica iteraciones "prueba y error" experimentales y caras. Así, parece esencial unir el proceso de desarrollo de producto, el diseño de la línea de producción y su proceso de configuración, con el objetivo de aprovechar adecuadamente la reconfigurabilidad y fiabilidad de los robots y de predecir cómo modificar la línea de producción para introducir nuevos productos.

Con el objetivo de evitar las desventajas mencionadas anteriormente y principalmente relacionadas con la ausencia de métodos predictivos del proceso de soldadura, el presente trabajo introduce una estrategia para secuenciar de manera óptima las operaciones de soldadura para así devolver un diseño efectivo del proceso de soldadura. Esto permite eliminar o al menos reducir gran parte de los pasos experimentales de "prueba y error". El método saca partido del uso concurrente de herramientas robóticas y herramientas de ingeniería multi-física asistida por ordenador (CAE). Consecuentemente se puede incluir en una estrategia sistemática más amplia para el diseño de chasis de automoción completamente basado en herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD). En esta estrategia, la información fluye desde la fase de diseño de las piezas, ensamblajes y utillajes hacia la fase de diseño del proceso. Los siguientes apartados describen la metodología propuesta. El inicio del apartado 2 introduce la principal estrategia del diseño sistemático como un todo, mientras el resto del apartado se centra

en la fase de diseño del proceso, con el objetivo de dar una descripción detallada de la estrategia de soldadura integrada. El apartado 3 detalla un caso de estudio seleccionado por los investigadores y su modelización con respecto a la herramienta asistida por ordenador seleccionada. El apartado 4 recopila los resultados para los casos reales y simulados y proporciona la comparación entre ambos. Finalmente, el apartado 5 concluye este artículo con las conclusiones y desarrollos futuros.

2. ESTRATEGIA DE DISEÑO DEL PROCESO DE SOLDADURA ROBÓTICA

El presente trabajo se centra en un componente específico de una estrategia de diseño general la cual está basada en tres fases principales, respectivamente relacionadas para el diseño de *Componentes*, *Fijaciones* y *Procesos*. Cada fase hace uso de herramientas específicas para conseguir un desarrollo sencillo de los componentes involucrados en el ensamblaje del chasis, como se resume en las tres áreas de la Fig. 1. Las fases de diseño del *Componente*, al *Fijación* y el *Proceso* se enmarcan en color verde claro, naranja claro y azul claro respectivamente. El desarrollo de un nuevo chasis de automoción comienza con la fase de diseño *Componentes*. Las entradas de esta fase son los requisitos de producto, como materiales, geometrías y resistencia estructural, así como los requisitos del proceso de soldadura, como por ejemplo los tipos de uniones soldadas [11]. El CAD y las anotaciones y tolerancias funcionales FTA son herramientas usadas para modelar el ensamblaje del chasis, así como los componentes relacionados, y para proporcionar anotaciones de las tolerancias requeridas directamente en los modelos 3D. Las salidas de esta fase son los modelos 3D de los componentes o ensamblajes enriquecidos con las anotaciones de tolerancias y los puntos fijos y de referencia que se usaran en el subsiguiente modelado de los utillajes de soldadura. El segundo paso se centra en el diseño de la *Fijación*. Con respecto a la tecnología de soldadura seleccionada, esta fase busca calcular los espacios entre las juntas y optimizar el diseño de las fijaciones hasta que esos espacios entran dentro de unos rangos requeridos.

Si los espacios cumplen las especificaciones comienza entonces la fase modelado CAD de la fijación; de lo contrario el proceso de diseño vuelve otra vez a la fase de diseño *Componentes* [11]. Un bucle iterativo se implementa entre las fases de diseño *Componentes* y *Fijación* hasta que se consigan los resultados deseados; las líneas punteadas en la Fig. 1 representan los bucles iterativos entre las tres fases principales de diseño. La fase de diseño *Fijación* utiliza, por un lado, herramientas de tolerancia asistidas por ordenador (CAT) para calcular los espacios entre los componentes y, por otro lado, herramientas CAD para modelar las fijaciones.

Las salidas de diseño del sistema *Fijación* son los modelos 3D de las fijaciones requeridas y la secuencia de ensamblaje de los componentes en las fijaciones. El diseño *Proceso* es el tercer paso del método integrado principal. Define el proceso de soldadura robótica utilizando herramientas específicas CAE que tienen funciones dedicadas para replicar el comportamiento

del robot a lo largo de las trayectorias de soldadura, que son las uniones que darán lugar al ensamblaje. Esta fase, discutida en más detalle en una sección diferente, devuelve los programas robóticos de soldadura requeridos para las uniones, así como la secuencia que minimiza las distorsiones del conjunto soldado.

2.1. FASE DE DISEÑO PROCESO

La fase de diseño *Proceso* es el principal argumento del presente trabajo. En consonancia, esta sección profundiza en esta fase y en las operaciones relacionadas para conseguir los programas de soldadura robótica óptimos y la secuencia que mantiene las distorsiones de soldadura del conjunto por debajo de unas especificaciones de diseño. La Fig. 2 da más detalles de los pasos incluidos dentro de la fase de diseño *Proceso*. Con respecto a la estrategia principal de diseño, las entradas de este paso son los modelos 3D de los componentes y el sistema de fijación, provenientes de los pasos anteriores, así

como los parámetros teóricos de la tecnología de soldadura, como, por ejemplo, los parámetros teóricos de soldadura, las secuencias teóricas de soldadura y los rangos de tolerancia admisibles. Usando las secuencias de soldadura teóricas provenientes de experiencias y conocimientos anteriores de casos de estudios industriales, se calculan las distorsiones teóricas. A continuación, se evalúan las distorsiones sobre puntos funcionales del chasis midiendo los desplazamientos x, y, z. Estos puntos son habitualmente los puntos de unión entre el chasis y otros componentes del automóvil (por ejemplo, motor, suspensión, etc.). Con respecto a los puntos funcionales, si los resultados provenientes de la simulación se encuentran dentro de los estándares internos de las compañías automovilísticas, el proceso de ingeniería termina y comienzan las verificaciones finales de los primeros prototipos. De lo contrario, la secuencia de unión requiere de más bucles iterativos de optimización hasta que se consigan los resultados deseados. Si la secuencia de unión minimiza las distorsiones finales, pero no entra en rangos, el proceso de diseño comienza el diseño *Componente* desde el primer paso. Las herramientas asistidas por ordenador utilizadas en este paso son la programación Off-line (OLP) y las herramientas CAE multi-físicas.

Las herramientas OLP devuelven las trayectorias de soldadura para cada unión del montaje. El entorno 3D se desarrolla con los modelos de los robots, los posicionadores y los sopletes de soldadura incluidos en la célula de soldadura, así como los equipamientos de apoyo requeridos para el proceso de soldadura. Los robots se programarán para guiar a los sopletes de soldadura de acuerdo con los parámetros teóricos del proceso, los cuales son los más influyentes en la calidad de las uniones soldadas. Los parámetros del proceso teóricos que más influyen en la unión soldada se modifican con respecto a las restricciones geométricas del soplete de soldadura, de las fijaciones y de los componentes. Consecuentemente, las salidas del OLP son los ángulos admisibles de soldadura para el soplete, respectivamente conocidos como ángulo de desplazamiento y ángulo de trabajo, así como los parámetros de soldadura relacionados con la entrada de calor.

Los parámetros del proceso definidos en la fase OLP serán usados en el siguiente análisis por medio de simulaciones por elementos finitos (EF) usando herramientas CAE multi-físicas sobre el chasis soldado. Este análisis dará la relación

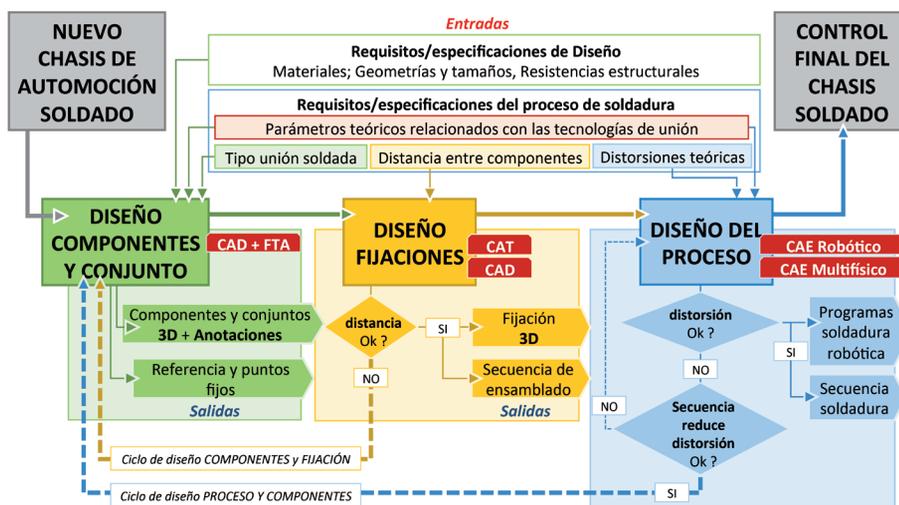


Fig. 1: Secuencia del método general e integrado basado en CAD para la soldadura de un chasis de automoción

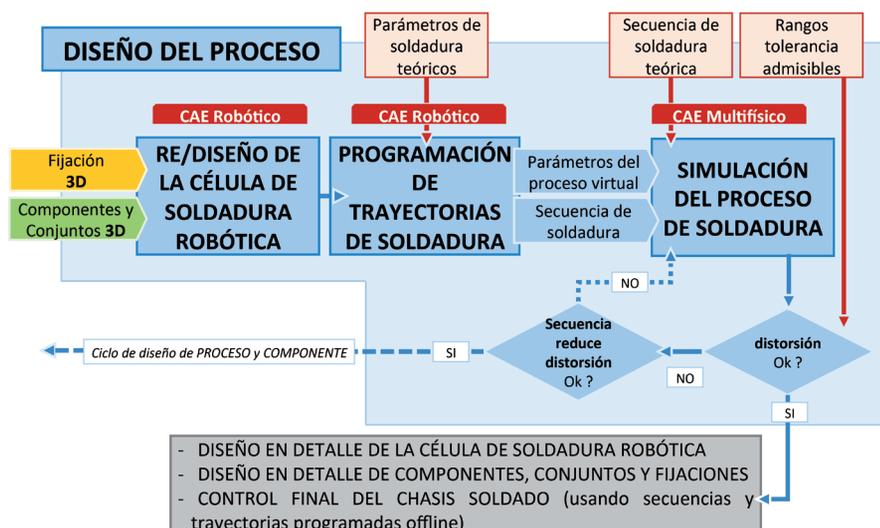


Fig. 2: Detalle de la fase Proceso, la cual se basa en el uso integrado de la Robótica y herramientas CAE multi-físicas

entre la distorsión del conjunto soldado y de la secuencia de soldadura con respecto a los parámetros de entrada de cada unión de soldada provenientes del OLP. Además, las entradas de la simulación EF también serán el tipo de unión soldada, los puntos fijos y de referencia de la fijación y las tensiones residuales de las uniones soldadas, que han sido identificadas en las fases previas *Componentes* y *Fijaciones*. Por lo tanto, el objetivo de la simulación por EF es identificar la secuencia de soldadura de las uniones que tenga unas distorsiones del montaje final dentro de las tolerancias requeridas. En el peor de los casos en los que no se identifiquen las secuencias apropiadas, el proceso de diseño vuelve a comenzar desde las fases previas *Fijaciones* o *Componentes*, donde el diseñador modifica respectivamente los tipos de unión o los puntos fijos o de referencia y las tolerancias del submontaje. Gracias al entorno paramétrico y variacional CAD/CAE los cambios se trasladarán automáticamente a las otras fases. Por el contrario, si las distorsiones se encuentran dentro del rango de tolerancias impuesto, con el OLP se creará la secuencia de movimientos robóticos para la secuencia completa de soldadura.

3. CASO DE ESTUDIO Y MODELOS TEÓRICOS

El método de diseño integrado propuesto en el apartado 2 se aplica a la evaluación del diseño de un submontaje de un chasis de coche. El caso de estudio propuesto ha sido también usado en investigaciones previas por los mismos autores centrándose en las fases de *Componentes* y *Fijaciones* [11], y, aquí, se continuará esa investigación con el objetivo de evaluar la fase *Proceso* del método de diseño propuesto. El montaje está fabricado mediante la soldadura de 20 uniones resultantes del ensamblaje de cuatro componentes, como se muestra en la parte izquierda de la Fig. 3. Dos componentes son fabricados mediante moldeo por cascara, componente 1 y 3, mientras que los otros son perfiles extruidos, componentes 2 y 4; todas las partes están hechas de una aleación de aluminio tipo EN AW-6082-T6. Un sistema robótico para la soldadura MIG se usa para el proceso de soldado. Como se muestra en el lado derecho de la Fig. 3, las partes del chasis se montan sobre los utillajes y guías de soldadura, de acuerdo al principio 3-2-1 [7], y la fijación completa ha sido diseñada para una célula de trabajo de soldadura robótica reconfigurable.

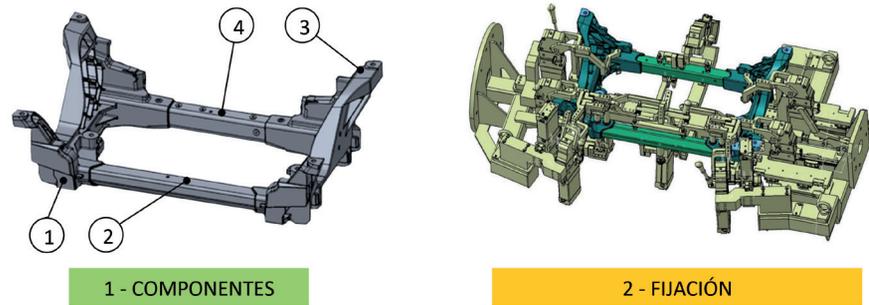


Fig. 3: Conjunto chasis con sus 4 componentes y las fijaciones, respectivamente en los lados izquierdo y derecho de la imagen

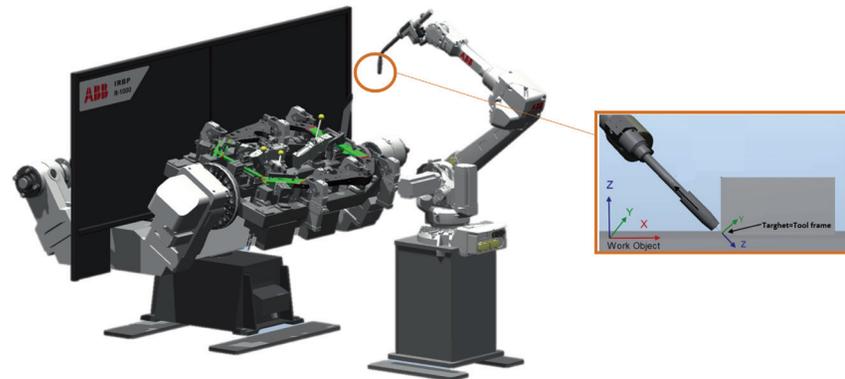


Fig. 4: En el lado izquierdo, la réplica de la célula de trabajo del robot dentro del entorno virtual RobotStudio; dentro del rectángulo de detalle, se muestra el sistema de referencia al final del hilo de soldadura

3.1. MODELIZACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN OFF-LINE

Para simular y programar el proceso de soldadura robótica, la célula de trabajo del robot ha sido replicada mediante ABB RobotStudio, que es una herramienta OLP dedicada de la compañía ABB para programar sus productos robóticos. Los principales componentes como el robot y el posicionador se han posicionado de acuerdo a la disposición teórica. La fijación tiene un diseño modular que permite reconfigurar la célula de trabajo con respecto a planificación de producción del chasis. Para crear las trayectorias de soldadura, tanto para el soplete de soldadura como la fijación, se tienen que definir los sistemas de referencia, respectivamente al final del hilo de soldadura del soplete para la *estructura herramienta*, y en el centro del borde del posicionador donde se amarraran las fijaciones, para la *estructura fijación*. La Fig. 4 muestra los modelos de la célula de trabajo del robot y una vista general de la *estructura herramienta*. De acuerdo a las metodologías de programación OLP [18, 19, 20], se dispone de un equipo de calibración dedicado con el objetivo de definir automáticamente los sistemas de referencia para alinear el OLP con la posición de los componentes reales, para así asegurar una adaptación continua de los programas del robot al cambio del hilo o en caso de colisiones inesperadas.

Utilizando la interfaz gráfica de la herramienta OLP seleccionada, cada trayectoria de soldadura ha sido definida creando los puntos de referencia que tiene que alcanzar el soplete del robot, situados en puntos significativos de la trayectoria de soldadura. En particular, en el caso de trayectorias rectas, se necesitan dos puntos, al principio y al final de la unión soldada, mientras que para trayectorias segmentadas o curvas se necesita un punto más correspondiente a los cambios de dirección. Además, otros puntos alejados de la trayectoria necesitan ser definidos para definir la entrada y salida a/desde las juntas soldadas. Esos puntos se alcanzan por la *estructura herramienta* dentro de rotaciones específicas alrededor de los ejes x, y, z, y los ángulos correctos tienen que seleccionarse en concordancia al proceso de soldadura y para evitar colisiones entre el soplete de soldadura y los utillajes de soldadura y/o el chasis. Como conclusión de este paso los puntos de soldadura del robot se unen usando instrucciones específicas de soldadura y los parámetros que más influyen en el proceso, a saber, el ángulo de trabajo, el ángulo de trayectoria, y la fuente de calor (por cordón ondulado-weave o por costura-seam), se han definido en las instrucciones del movimiento del robot. Toda la información se usará en la simulación de EF para predecir las distorsiones de soldadura.



Fig. 5: Modelado del conjunto chasis para las simulaciones CAE: desde el lado izquierdo, nodo con restricciones "tie", tensiones residuales iniciales y grados de libertad restringidos

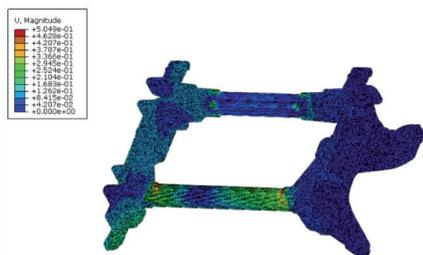


Fig. 6: Distorsiones resultantes del montaje (mm)

3.2. MODELADO CAE MULTIFÍSICO

La secuencia de referencia de soldadura, proveniente del conocimiento industrial, se convierte en la entrada de simulación del proceso de soldadura [21].

La simulación se hace por medio de simulaciones de EF, usando herramientas multi-físicas CAE. En particular, el método numérico para simular las distorsiones en el chasis soldado es el método local-global presentado en [22]. Este método es capaz de reducir el tiempo computacional pero tiene una precisión baja si se compara con las simulaciones de EF que hacen uso de un análisis termo-elasto-plástico (TEP) [23]. Como se muestra en la Fig. 5, el análisis de EF del chasis ha sido definido usando el mismo parámetro del análisis ejecutado en los anteriores pasos de diseño *Componentes* y *Fijaciones*. Las juntas de soldadura y los puntos de referencia de la fijación han sido modelados con restricciones específicas. El uso de las restricciones "tie" para las juntas de soldadura permite igualdad de movimientos/distorsiones de los nodos

involucrados en las juntas soldadas; los mismos nodos también se usan para definir las condiciones iniciales de tensiones residuales recopiladas de la simulación única en los pasos iniciales de diseño.

Los grados de libertad de las piezas individuales se bloquean para los nodos que están involucrados en los guías de bloqueo de las fijaciones. Las líneas amarillas, las líneas rojas y los puntos rojos mostrados en la Fig. 5 identifican los nodos con restricciones "tie", las tensiones residuales y los grados de libertad bloqueados.

4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Los análisis han sido llevados a cabo en un Intel (R) Xeon CPU E5-1620 3.60GHZ con 8GB RAM que necesitó ocho horas para mostrar los resultados de desplazamientos. Las distorsiones del chasis completo se muestran en la Fig. 6. En particular, los desplazamientos en las direcciones x, y, z, se han calculado en los puntos funcionales localizados en el chasis en las zonas de interconexión con otros componentes del automóvil (por razones confidenciales la posición de estos puntos no se puede revelar).

La Tabla 1 muestra los valores de las distorsiones simuladas y de los rangos de tolerancia admisibles en los puntos funcionales. Las distorsiones simuladas provenientes del CAE se identifican con la letra U; los rangos de tolerancias ad-

misibles de los estándares internos de las compañías de automoción se identifican con la letra T. Para ambos casos, los sub-índices identifican las direcciones cartesianas sobre la que se calculan los valores. Con el objetivo de validar los parámetros de soldadura, los valores de las distorsiones simuladas se han comparado con los rangos de tolerancia admisibles. Para una clara comprensión y comparación entre los valores, las filas de la Tabla 1 sombreadas en gris claro indican los valores de las distorsiones simuladas; estos valores no tienen signo por motivos confidenciales. Los valores no sombreados muestran los valores de las tolerancias admisibles con respecto a los puntos funcionales.

Los datos mostrados en la Tabla 1 indican que los valores de los desplazamientos simulados se encuentran dentro de los rangos de tolerancia admisible. Así, de acuerdo a la metodología propuesta, la secuencia completa de la simulación de soldadura se podría implementar en el OLP, con el objetivo de crear el programa robótico completo.

Para validar el modelo propuesto, los datos teóricos para el chasis de referencia se comparan con datos experimentales, provenientes de procesos de soldadura reales. En particular, el caso de estudio replicado usando un programa robótico proveniente del OLP y que se ha ejecutado en una célula robótica que se ha montado de acuerdo a la configuración teórica (Fig. 4). Las distorsiones en el chasis se miden por medio de una máquina de medir por coordenadas (CMM) en los puntos funcionales. Por razones confidenciales los valores de la distorsión debido al proceso de soldadura no se pueden mostrar, pero en la Tabla 2 se muestra el porcentaje de error en la distorsión entre los datos experimentales y simulados.

Nuevamente, los resultados muestran que los valores de los desplazamientos

Puntos funcionales		110	111	112	113	114	115	117	220	221	223	224	225
Distorsiones simuladas	U _x	0,47	0,09	0,02	0,04	0,28	0,18	0,03	0,05	0,02	0,03	0,15	0,01
	U _y	0,07	0,09	0,07	0,09	0,07	0,07	0,11	0,09	0,08	0,05	0,07	0,09
	U _z	0,02	0,07	0,24	0,53	0,05	0,11	0,28	0,06	0,09	0,38	0,04	0,10
Rangos de tolerancia admisible	T _x	±0,8	±0,3			±0,8		±0,8	±0,3			±0,8	
	T _y	±0,3	±0,3					±0,3	±0,3				
	T _z	±0,5	±0,3	±0,5	±1		±0,5	±0,5	±0,3	±0,5	±1		±0,5

Tabla 1: Distorsiones simuladas y rangos de tolerancia admisible en puntos funcionales (mm)

Puntos funcionales		110	111	112	113	114	115	117	220	221	223	224	225
% De error	X	30	40			13		67	17			32	
	Y	36	18					8	10				
	Z	50	13	33	26		15	3	14	10	55		17

Tabla 2: Comparación entre datos simulados y experimentales en los valores de distorsión

simulados se encuentran dentro de los desplazamientos calculados con la CMM (valores en negrita). En concreto, se obtiene un error medio del 30% entre los datos experimentales y simulados, lo que se corresponde con las distorsiones residuales en el montaje. Para corregir las desviaciones inesperadas del comportamiento teórico, de acuerdo con la metodología de diseño propuesta, es posible actuar en una o en todas las fases de diseño *Componente*, *Fijación* y *Proceso*. Para el caso de estudio mostrado en este artículo, la solución ha sido de redefinir los parámetros *Fijación* que resulta en el ajuste manual de la posición de los puntos de bloqueo. Como resultado esta solución disminuye en un tercio las distorsiones del montaje a lo largo de la dirección Z.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Esta investigación ha propuesto una estrategia de diseño para un proceso de soldadura robótica integrada en un método de diseño general. En concreto, se ha analizado la calidad de un chasis en términos de distorsión con el objetivo de reducir las fases de "prueba y error", así como el tiempo de lanzamiento al mercado. La metodología ha sido validada por medio de análisis robóticos y multi-físicos CAE sobre el montaje de un chasis de coche permitiendo una validación de la secuencia y los parámetros de soldadura en una fase temprana de diseño. Por un lado, con el CAE robótico se han definido los parámetros de soldadura en función del tamaño de los utillajes/guías de soldadura y de los componentes. Por otro lado, esos parámetros se han utilizado en el CAE multi-físico con el objetivo de predecir las distorsiones debido al proceso de soldadura.

Como validación de los parámetros de soldadura (definidos por medio del CAE robótico), las distorsiones provenientes de la simulación han sido comparadas con los resultados de procesos de soldadura reales realizados en células de trabajo robóticas. Los resultados muestran que los desplazamientos simulados se encuentran dentro de las zonas de tolerancia. Sin embargo, los valores de las distorsiones simuladas subestiman los valores reales en un 30%. Esta limitación se puede minimizar usando una simulación de soldadura más precisa (por ejemplo, usando software específico o métodos más precisos). Además, las actuales simulaciones del proceso de soldadura no incluyen la variabilidad debido al cambio de los parámetros de entrada, proporcionando solo distorsiones nominales. Se po-

dría conseguir una predicción más precisa de las distorsiones de soldadura modificando los parámetros de entrada dentro de los valores de tolerancia industriales, proporcionando las tolerancias del proceso.

Las líneas futuras estarían relacionadas con la simulación de este caso de estudio con un método más preciso, esto es, mediante el método TEP, al igual que la modificación de los parámetros de entrada dentro de los valores de tolerancia industriales, proporcionando las tolerancias del proceso.

REFERENCIAS

- Barnes T, Pashby I. "Joining techniques for aluminum spaceframes used in automobiles. Part I - solid and liquid phase welding". *J Mater Process Technol* March 2000. Vol.99-1. p.62-71. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00367-2
- Weman K. "Pulsed MIG welding". In: Weman K and Lindén G (ed). *Mig Welding Guide*. Woodhead Publishing, 2006. p.90-97. DOI:http://dx.doi.org/10.1533/9781845691479.1.90
- Pan Z, Polden J, Larkin N, et al. "Recent progress on programming methods for industrial robots". *Robot Comput Integr Manuf* April 2012. Vol.28-2. p.87-94. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2011.08.004
- Mandal NR. *Aluminum Welding*. 1st Edition. Woodhead Publishing, 2001. 160p. ISBN:978-18-557-3597-2
- Pahl G, Beitz W, Feldhusen J, et al. *Engineering design: A systematic approach*. 3rd Edition. London: Springer-Verlag, 2007. XXI-617p. ISBN: 978-1-84628-318-5
- Ulrich K, Eppinger S. *Product Design and Development*. 5th Edition. McGraw-Hill Education, 2011. 432p. ISBN: 978-00-734-0477-6
- Gherardini F, Zardin B, Leali F. "A parametric CAD-based method for modelling and simulation of positive displacement machines". *J Mech Sci Technol*. September 2016. Vol.30-7. p.3253-63. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s12206-016-0634-3
- Zardin B, Borghi M, Gherardini F, et al. "Modelling and Simulation of a Hydrostatic Steering System for Agricultural Tractors". *Energies* January 2018. Vol.11-2. n.230. DOI:http://dx.doi.org/10.3390/en11010230
- Fuentes FJ, Trouvé V, Blessing E, et al. "Status of ITER dimensional tolerance studies". *Fusion Eng Des* October 2013. Vol.88-6/8. p.597-601. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.01.061
- Lee DC, Han CS. "CAE (computer aided engineering) driven durability model verification for the automotive structure development". *Finite Elem Anal Des* April 2009. Vol.45-5. p.324-332. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2008.10.004
- Panari D, Renzi C, Vergnano A, et al. "Integrated design method for optimal tolerance stack evaluation for top class automotive chassis". *Lecture Notes in Mechanical Engineering* September 2017. p.1013-1022. DOI:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9_101
- Dantan J-Y, Anwer N, Mathieu L. "Integrated tolerancing process for conceptual design". *CIRP Ann - Manuf Technol* June 2003. Vol.52-1. p.135-138. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60549-6

- Ramos Barbero B, Pérez Azcona J, González Pérez J. "A tolerance analysis and optimization methodology. The combined use of 3D CAT, a dimensional hierarchization matrix and an optimization algorithm". *Int J Adv Manuf Technol* October 2015. Vol.81-1/4. p.371-385. DOI:http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7068-4
- Di Angelo L, Di Stefano P, Morabito AE. "Automatic evaluation of form errors in high-density acquired surfaces". *Int J Prod Res April* 2011. Vol.49-7. p.2061-2082. DOI:http://dx.doi.org/10.1080/00207541003657370
- Manurung YHP, Sulaiman MS, Abas SK, et al. "Investigation on welding distortion of combined butt and T-joints with 9-mm thickness using FEM and experiment". *Int J Adv Manuf Technol* March 2015. Vol.77-5/8. p.775-782. DOI:http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6268-7
- Ueda Y, Murakawa H, Ma N. *Welding Deformation and Residual Stress Prevention*. Elsevier Inc., 2012. 312p. ISBN: 978-0-12-394804-5
- Biswas P, Mahapatra MM, Mandal NR. "Numerical and experimental study on prediction of thermal history and residual deformation of double-sided fillet welding". *J Eng Manuf* January 2010. Vol.224-1. p.125-134. DOI:http://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM1666
- Leali F, Pellicciari M, Pini F, et al. "An offline programming method for the robotic Deburring of aerospace components". *Commun Comput Inf Sci*. 2013. Vol.371. p.1-13. DOI:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-39223-8_1
- Leali F, Pini F, Ansaloni M. "Integration of CAM off-line programming in robot high-accuracy machining". *Proc. IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SII* 2013. p.580-585. DOI:http://dx.doi.org/10.1109/SII.2013.6776741
- Leali F, Pellicciari M, Pini F, et al. "A calibration method for the integrated design of finishing robotic workcells in the aerospace industry". *Commun Comput Inf Sci*. 2013. Vol.371. p.37-48. DOI:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-39223-8_4
- Bonazzi E, Colombini E, Panari D, et al. "Numerical Simulation and Experimental Validation of MIG Welding of T-Joints of Thin Aluminum Plates for Top Class Vehicles". *Metall Mater Trans: A Phys Metall Mater Sci*. January 2017. Vol.48-1. p.379-388. DOI:http://dx.doi.org/10.1007/s11661-016-3834-7
- W. Perret, R. Thater, U. Alber, et al. "Approach to assess a fast welding simulation in an industrial environment — Application for an automotive welded part". *Int J Automot Technol*. December 2011. Vol.12-6. p.895-901. DOI:http://dx.doi.org/10.1007/s12239-011-0102-0
- Duan YG, Vincent Y, Boitout F, et al. "Prediction of welding residual distortions of large structures using a local/global approach". *J Mech Sci Technol* October 2007. Vol.21-10. p.1700-1706. DOI:http://dx.doi.org/10.1007/BF03177397

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido apoyada por las empresas OMR Spa y SIR Spa, ubicadas en Modena-Italy, que respectivamente proporcionaron el caso de estudio y la célula de trabajo robótica para realizar las simulaciones y las evaluaciones que sirvieron para validar el método propuesto.