

SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE SOLDADURA DE COMPONENTES MEDIANTE LA MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Autores principales: Juan Alberto Pozo Morejón y Rafael Goytisoló Espinosa

Otros autores: Félix Ramos Morales, José Burgos Sola, Hernán Hernández Herrera, Alejandro Duffus Scott, Manuel Rodríguez Pérez, Jorge Moya Rodríguez, Ramón Martínez García, Inga María Jackson, Osdiel Hernández Pérez y Amado Cruz Crespo

Colaboradores: Eduardo Díaz Cedré, Jorge V. Miguel Oria, José Monteagudo Yanes, Osmany Becerra Rodríguez, Marcos Consuegra Urquiza, Adalberto García Sánchez, Yoan Luján Rodríguez, Marcial Avilés Castaigne, Isabel Curbelo Valladares.

Entidades Ejecutoras Principales: Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas y Universidad Carlos Rafael Rodríguez de Cienfuegos

Dr. Juan A. Pozo Morejón (20%). Desarrolló una tesis doctoral y asesoró una tesis de maestría y varias tesis de grado sobre la temática. Desarrolló y validó una metodología para la simulación del proceso de soldeo empleando el software ANSYS, de uso general. Desde hace algunos años dirige la línea de investigación de “simulación de soldaduras” en la UCLV. Autor o coautor de varias de las publicaciones de la UCLV. jpozo@uclv.edu.cu

Dr. Rafael Goytisoló Espinosa (20%). Coordinador de todo el trabajo realizado por parte de la Universidad de Cienfuegos. Tutor de una Tesis de Doctorado y varias Tesis de Maestría vinculadas. Autor Principal de todos los aportes relacionados en la propuesta, de la UCf. ragoyti@ucf.edu.cu

Dr. Félix Ramos Morales (15%). Desarrolló una tesis doctoral sobre el tema. Aplicó una metodología para la simulación del proceso de soldeo empleando el software COSMOS DESING STAR, de uso general. Autor o coautor de varias de las publicaciones de la UCLV.

Dr. José Burgos Sola (10%). Fue el iniciador de las investigaciones en la temática de la simulación de soldaduras en el UCLV. Asesoró una tesis doctoral en la temática. Implementó la simulación empleando el software COSMOS M, de uso general. Autor o coautor de varias de las publicaciones de la UCLV.

Dr. Hernán Hernández Herrera (8%). Autor de una tesis de doctorado sobre el tema y de una de Tesis de Maestría. Coautor de todos los aportes relacionados en la propuesta, de la UCf.

Dr. Jorge Moya Rodríguez (5%). Cotutor de dos Tesis de Doctorado sobre el tema y de una Tesis de Maestría. Coautor de todos los aportes relacionados en la propuesta, de la UCf y de alguna publicación de la UCLV.

Dr. Alejandro Duffus Scott (5%). Tutor de dos Tesis de Doctorado sobre el tema. Cotutor de varias de las publicaciones de la UCLV.

Dr. Manuel Rodríguez Pérez (5%). Tutor de dos Tesis de Doctorado sobre el tema. Cotutor de varias de las publicaciones de la UCLV.

Dr. Ramón Martínez García (4%). Autor de una tesis de doctorado sobre el tema. Coautor de alguna publicación sobre el tema.

MSc. Inga María Jackson (3%). Autor de una Tesis de Maestría. Coautor de varias publicaciones de la UCf.

MSc. Osdiel Hernández Pérez (3%). Autor de una Tesis de Maestría. Coautor de varias publicaciones de la UCf.

Dr. Amado Cruz Crespo (2%). Coautor de varias de las publicaciones de la UCLV.

RESUMEN

La simulación de soldaduras mediante métodos numéricos como los elementos finitos, constituye un tema de gran actualidad, que presenta aún muchas áreas no suficientemente estudiadas y aspectos científicos no esclarecidos. Por otro lado, las metodologías de simulación son abordadas en la literatura solo parcialmente, presentan contradicciones y en muchos casos se basan en el empleo de *softwares* especializados en el tema, propiedad de grandes empresas internacionales y de un elevado costo. El presente trabajo se propuso el objetivo de desarrollar y validar una metodología de modelación de la evolución de la historia térmica, tensiones y deformaciones producidas por el proceso de soldadura, mediante software de elementos finitos de uso general. La metodología desarrollada se aplicó con éxito y se validó contra resultados experimentales en la simulación de procesos de soldeo SMAW, GMAW y GTAW, sobre elementos fabricados de aceros al carbono y de baja aleación, aceros inoxidable y aleaciones de aluminio, de amplio empleo en la industria moderna. El trabajo abarca también el desarrollo de nuevas expresiones para el cálculo, en base a la Teoría de los perfiles de paredes delgadas, de las tensiones en costuras soldadas de diversas geometrías sometidas a distintas sollicitaciones. Abarca asimismo su validación a través de la simulación mediante elementos finitos. El impacto científico se sustenta en que el trabajo incluye los resultados de cinco tesis doctorales defendidas con éxito, nueve publicaciones en revistas de la Web of Science, diez publicaciones en revistas indizadas, tres de estas últimas consideradas publicaciones en revistas

del grupo 1, y 22 publicaciones en memorias de eventos internacionales. La metodología de simulación desarrollada ha sido aplicada con éxito al establecimiento de procedimientos de soldeo de componentes en diversas industrias del territorio central del país, contribuyendo a la reducción del tiempo de desarrollo de prototipos y a la reducción de los costos de fabricación. Los resultados teóricos aportados acerca de la reparación en servicio de oleoductos constituyen una contribución a la seguridad de trabajos de este tipo y a la reducción del riesgo de desastres. Finalmente, la metodología y expresiones desarrolladas para el cálculo de las tensiones en uniones soldadas se han aplicado en otros sectores de la economía, como por ejemplo para el cálculo de una viga soldada efectuado durante la restauración del Hotel San Carlos.

COMUNICACIÓN CORTA

Introducción

A pesar de que las publicaciones sobre el tema de la modelación de soldaduras mediante MEF se han multiplicado en la actual década, este es aún, sin dudas, un campo en el que existe un fuerte debate, se carece en muchos casos de criterios unificados y en el que la información se encuentra dispersa o protegida por intereses de grupos. El presente trabajo se llevó a cabo con el objetivo de desarrollar y validar una metodología de simulación del proceso de soldeo empleando softwares de elementos finitos de uso general, disponibles en nuestro país, como ANSYS y COSMOS DESING STAR, y emplearla en la solución de diversos problemas en el campo de la soldadura, con amplias posibilidades de aplicación industrial.

Ninguno de los autores consultados toma en cuenta la influencia que tiene la excentricidad de la carga aplicada en uniones con costuras de filete, ni la teoría de los perfiles de paredes delgadas, para la consideración de los efectos de flexión y torsión que aparecen en los cordones, introduciendo por ello errores en los cálculos que no pueden ser admitidos en uniones con cargas cíclicas. El trabajo persigue también el desarrollo de nuevas expresiones para el cálculo, en base a la Teoría de los perfiles de paredes delgadas, de las tensiones en costuras soldadas de diversas geometrías, sometidas a distintas solicitaciones y su validación a través de la simulación mediante elementos finitos.

Materiales y métodos

Se desarrolla y valida una metodología de modelación de la evolución de la historia térmica, tensiones y deformaciones producidas por el proceso de soldadura, mediante los softwares de elementos finitos de uso general ANSYS Multiphysics y COSMOS DESING STAR. La metodología se aplica con éxito, en un primer estudio, en la modelación tridimensional de una soldadura GMAW automática sobre chapas de aleación de aluminio al magnesio 5083-O, y en un segundo, a la soldadura GMAW sobre una aleación de aluminio 5052 H32, de amplio empleo en la industria moderna. En un tercer estudio se enriquece la

metodología de simulación térmica de soldaduras previamente desarrollada, con la implementación del “modelo de doble elipsoide”, mediante una subrutina de programación. La metodología se aplica con éxito a la simulación de un experimento de soldadura GTAW sobre placa de acero inoxidable austenítico. En un cuarto estudio se modeló, (a diferencia de los estudios anteriores con ANSYS), empleando el software COSMOS Design Star para simular la soldadura a tope de dos placas de acero con bajo contenido de carbono y baja aleación con electrodo E 7018 de 3,2 mm de diámetro. Se investiga la influencia sobre la distribución de temperaturas en la placa producto del proceso de soldeo al considerar la termodependencia de diferentes propiedades físicas del acero (conductividad térmica y calor específico).

En un quinto estudio se creó, empleando el software anterior, un modelo de elementos finitos de una soldadura de filete en unión a solape de placas de acero al carbono y se estudió el nivel de correspondencia entre los resultados del modelo y los experimentales. En un sexto estudio se analizó el comportamiento térmico durante la soldadura de reparación, en condiciones de servicio, de un tubo de 610 mm y espesor de 6,4 mm que transporta petróleo, mediante un modelo tridimensional (3D) de elementos finitos, que representa una sección reforzada del tubo. En un séptimo estudio, relacionado con los anteriores, se analiza la distribución de tensiones en la sección transversal de una sección de oleoducto (con relación diámetro–espesor del tubo $[d/t]$ de aproximadamente 95) y con un refuerzo circunferencial soldado mediante costura de filete.

Finalmente, en una última trilogía de estudios empleando la Teoría de la torsión de perfiles de paredes delgadas, así como otros conocimientos de la resistencia de materiales, se desarrollan nuevas expresiones para el cálculo de las tensiones en uniones soldadas de diferente geometría, las que se validan empleando la simulación por elementos finitos con el software COSMOS Design Star.

Resultados

Metodología de modelación mediante ANSYS de la historia térmica, tensiones y deformaciones de soldadura

Como resultados fundamentales de este trabajo:

- Se confirma que el Software ANSYS Multiphysics versión 9.0 de uso general puede ser empleado satisfactoriamente en la modelación de la historia térmica, tensiones y deformaciones de soldaduras, brindando resultados tan fiables como cualquier código de elementos finitos especializado.
- Se corrobora que la activación de los elementos de la soldadura tanto en la corrida térmica como en la estructural, en el paso de tiempo en el que la fuente de calor se encuentra sobre ellos, conjugado con el empleo de una temperatura de referencia de los elementos de la soldadura igual a la temperatura de fusión del metal, conduce a resultados precisos en el cómputo de la historia térmica, tensiones y deformaciones de soldadura, evitándose falsas deformaciones elastoplásticas.

- Se corrobora que el empleo del modelo de material con comportamiento elastoplástico del tipo *bilineal* conduce a resultados precisos. Se considera que los modelos con y sin endurecimiento son los que más fielmente describen el fenómeno termodéformacional de la soldadura GMAW de aleaciones aluminio–magnesio.
- Se confirma que el empleo de una temperatura de corte en la corrida estructural igual a la temperatura de fusión de la aleación evita cuantificar falsas deformaciones elastoplásticas a temperaturas superiores, cuando en el proceso físico real el metal se encuentra en fase líquida o sólida-líquida, evitándose también la necesidad de un ajuste exquisito de las propiedades a temperaturas superiores, lo que pudiera representar alguna dificultad.
- Se considera que solo los modelos tridimensionales son capaces de reproducir con precisión el comportamiento tensional de las uniones soldadas al simular el proceso, y que estos modelos permiten determinar el valor máximo de tensión transversal de compresión que se produce en las zonas al inicio y fin de la soldadura, lo que es prácticamente inalcanzable para los modelos en dos dimensiones.

Modelación mediante MEF de tensiones y deformaciones en soldadura GMAW sobre aleación de aluminio 5052 H32 [1]

- Se demostró que las particularidades de entrada de calor al modelo mediante un flujo de calor uniforme a través de la superficie del elemento, así como despreciar la radiación de calor al medio, no introducen diferencias apreciables en los resultados obtenidos en la corrida térmica.
- Los modelos elaborados brindaron de manera correcta la variación del desplazamiento vertical del punto central A, con la misma tendencia y punto de inflexión seguida por los puntos experimentales y coincidiendo prácticamente entre sí. El desplazamiento residual luego del total enfriamiento predicho por todos los modelos presenta un error inferior al 10%.
- Todos los modelos concordaron con los resultados experimentales de tensiones residuales longitudinales en la región fuera de la zona de deformaciones plásticas. Sin embargo, el modelo que considera el efecto de recocido que sufre la aleación debido al calentamiento por encima de 230°C, algo no considerado por otros autores en trabajos precedentes, es el que mejor se aproximó a los resultados de máxima tensión residual longitudinal, aunque aún en este caso el error relativo se mantuvo alto.
- Se confirma que la metodología de simulación y el software ANSYS pueden ser empleados satisfactoriamente en la modelación de tensiones y deformaciones de soldaduras, en aleaciones de aluminio de la serie 5XXX, no tratables térmicamente, brindando resultados semejantes a softwares de elementos finitos especializados, de los que no se dispone.

Análisis térmico de soldadura GTAW sobre placa de acero AISI 316L empleando el método de elementos finitos [2]

- Se comprueba que los resultados obtenidos en las simulaciones de soldadura mediante MEF, de temperaturas de ciclos térmicos para puntos situados a diferentes distancias y de dimensiones del baño, manifiestan una alta correlación con los experimentales, lo cual evidencia la adecuada selección de las propiedades termofísicas del acero AISI 316L y la validez de la metodología para la ejecución de un análisis térmico, mediante ANSYS, así como de la subrutina que implementa el modelo de doble elipsoide de Goldak, en un sistema de coordenadas cartesiano.
- Se corrobora que el paso de tiempo elegido para las corridas térmicas durante una simulación de soldadura mediante MEF no debe sobrepasar el valor que provoca un desplazamiento de la fuente de 1/3 veces la longitud de la fuente. Se comprueba que en la medida que el paso de tiempo aumenta, aumenta proporcionalmente el retraso de las curvas de temperaturas calculadas respecto a las experimentales.
- La metodología enriquecida de modelación de soldaduras constituye un paso de avance hacia la posibilidad de estudio de diversos fenómenos propios del proceso de soldeo, empleando un software de MEF de uso general, y la solución de múltiples problemas industriales, a tono con los esfuerzos que se desarrollan en este campo a nivel mundial.

Influencia de la termodependencia de las propiedades físicas del acero en la simulación por elementos finitos del proceso de soldadura

- Cuando no se considera la termodependencia de la conductividad térmica y del calor específico, o cuando solo la primera de las propiedades antes mencionadas depende de la temperatura, se obtienen valores sobrestimados de temperatura, en la zona aledaña al cordón.
- Se comprobó que el ancho de la zona fundida, obtenido del modelo de elementos finitos, es fuertemente dependiente de cuál de las propiedades físicas se considera termodependiente.
- Se demostró que siempre que se disponga de datos confiables de termodependencia de las propiedades físicas, estos se deben emplear en la modelación del proceso de soldadura (incluyendo la dependencia respecto a la temperatura de ambas propiedades físicas: calor específico y conductividad térmica), independientemente del aumento en el consumo de tiempo computacional.

Modelo de elementos finitos para determinar el campo de temperatura en una costura de filete

- Se demostró que es posible calibrar modelos de elementos finitos que simulen campos de temperatura debido a la soldadura, a través de su comparación con los límites de las zonas fundida y afectada térmicamente obtenidos experimentalmente en una probeta, vía más rápida y sencilla para esto.
- Se demostró que los picos de temperatura obtenidos para la zona fundida no pueden ser considerados con fines prácticos pues se encuentran sobreestimados debido a la consideración de calor distribuido uniformemente. Si se requiere mayor precisión en los resultados de temperatura en la zona fundida, esta dificultad se resuelve empleando el modelo de doble elipsoide de Goldak y la metodología de simulación mediante ANSYS, descrito en los estudios expuestos anteriormente.

Energía calorífica necesaria durante la soldadura en servicio de tuberías para el transporte de petróleo [3]

- Se establecieron ecuaciones de regresión que relacionan al calor de entrada de la soldadura, la temperatura de precalentamiento y el coeficiente para la transferencia de calor por convección, con la temperatura máxima en la superficie interna del tubo y el tiempo de enfriamiento entre 800 °C y 500 °C de un punto situado en la ZAC. Estas ecuaciones poseen soluciones comunes para aceros con un $t_{8/5}$ crítico menor que siete segundos si se garantiza que la temperatura máxima en la superficie interna del tubo no exceda 982 °C.
- A partir de la solución de las ecuaciones obtenidas, es posible seleccionar niveles de energía calorífica a aportar durante el desarrollo del proceso de soldadura, siempre que se evite la ocurrencia simultánea de perforaciones en la pared del tubo y de agrietamiento en frío en la ZAC.
- Los nomogramas creados a partir de las ecuaciones generales obtenidas presentan gran valor práctico para la selección de las condiciones en que se ha de desarrollar el proceso de soldadura de reparación en servicio de oleoductos, lo que es de gran interés para la empresa Unión Cubapetroleo (Cupet).

Determinación de tensiones en costura de filete de un tubo reforzado y presurizado, empleando modelos de material elásticos y elastoplásticos, a través del análisis por elementos finitos

- Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que la distribución de tensiones, en la zona estudiada en la sección transversal de un tubo de oleoducto reforzado, es prácticamente independiente de la magnitud de la holgura tubo–refuerzo. A pesar de que se considera un radio de redondeo considerable, las zonas inferior y superior del extremo de la holgura se erigen como concentradores de tensiones; en estas condiciones, si el modelo de material considerado es lineal elástico, la magnitud de las tensiones supera el límite de fluencia, lo que es poco realista.

- Se comprobó que la consideración del modelo elastoplástico redistribuye las tensiones hacia las zonas menos cargadas y se comprueba a partir del modelo que esta zona, considerado una presión interna de 6 MPa, no ha agotado aún su capacidad portante de carga.

Trilogía de estudios acerca de nuevas expresiones de cálculo de resistencia de uniones soldadas [4, 5]

- La simulación mediante el método de los elementos finitos del estado tensional de las uniones soldadas sometidas a cargas externas contempla todos los elementos presentes en las mismas, como excentricidad de la carga, distribución no uniforme de las deformaciones a lo largo de la unión y concentración de tensiones en el cordón, por lo que constituye una valiosa herramienta para validar las expresiones de cálculo desarrolladas.
- En esta última trilogía de estudios se desarrollaron nuevas expresiones para el cálculo de las tensiones en diversos tipos de configuración de uniones con soldaduras de filete, sometidas a diversas solicitaciones, mediante la aplicación consecuente de la teoría del estado tensional, las hipótesis de resistencia y la teoría de los perfiles de paredes delgadas, que superan en precisión a las establecidas en la literatura. En todos los casos el nivel de precisión se determinó comparando los resultados de dichas expresiones respecto a los valores de tensiones obtenidos mediante la simulación por elementos finitos.
- En el caso de uniones a solape con costuras longitudinales y transversales se introdujo un coeficiente k_d que toma en cuenta la influencia de las dimensiones de la unión y por lo tanto la excentricidad de la carga y la variación de las tensiones a lo largo de la longitud del cordón, lo que permite tener una aproximación mucho mejor que las expresiones tradicionales respecto a los resultados simulados. Los valores de k_d fueron graficados en función de los parámetros geométricos fundamentales de las uniones mencionadas lo que aporta una gran importancia práctica por la simplicidad de su empleo.
- Se desarrolló un método de cálculo que permite determinar qué parte de la carga total aplicada es asimilada por cada una de las partes componentes de una unión soldada mixta cualquiera, lo que fue aplicado al análisis de una viga de refuerzo de la estructura del Hotel San Carlos.
- La aplicación de la Teoría de la torsión de perfiles de paredes delgadas al cálculo de las tensiones en el caso de las costuras de filete sometidas a la torsión, arroja valores de un orden diez o más veces mayor con relación a las calculados por los métodos tradicionales expuestos en la literatura, lo que se corresponde mejor con los valores obtenidos mediante la simulación por MEF.
- Se desarrollaron nuevas expresiones de cálculo de las tensiones tangenciales de un conjunto de secciones de configuración geométrica compleja sometidas a torsión, que contemplan las particularidades de la torsión en perfiles de paredes delgadas. Estas expresiones resultan novedosas y útiles, además que arrojan notables diferencias con relación a las planteadas por otros autores.

Referencias bibliográficas

Todos los resultados anteriores han sido publicados por los autores en revistas de alto impacto. A continuación se relacionan algunos de ellos.

(1) Pozo Morejón, J. A. y otros. (2008). **Modelación mediante MEF de tensiones y deformaciones en soldadura GMAW sobre Aleación De Aluminio 5052 H32.** Revista Soldagem & Inspeção. Vol. 13, No. 4, p.329-337, Oct.ubre/Diciembre. Editora ABS.

(2) Pozo-Morejón, J. A. y otros (2011). **Análisis térmico de soldadura GTAW sobre placa de acero AISI 316L empleando el método de elementos finitos.** Revista Soldagem & Inspeção. Vol.16, No. 3, p.256-264, Julio/Septiembre. Editora ABS, Brasil.

(3) Ramos Morales, F.; Duffus Scott, A.; Rodríguez Pérez, M.; Díaz Cedré, E.; Pozo Morejón, J. A. (2009). **Energía calorífica necesaria durante la soldadura en servicio de tuberías para el transporte de petróleo.** Soldagem & Inspeção. Vol. 14, No. 1, p. 047-057, Enero/Mar. Editora ABS, Brasil.

(4) Goytisol Espinosa, R y otros (2005) **Improved scheme of analysis and stress computation in lap joints with welds transversely and longitudinally loaded.** Proceedings, ASME 2005, American Society of Mechanical Engineering, Orlando, Florida, EUA.

(5) Goytisol Espinosa, R y otros (2005) **New expressions for fillet weld torsion shear stresses calculation.** ASME 2005, Proceedings, American Society of Mechanical Engineering Orlando, Florida, E.U.A.