

Estado del arte sobre la integridad estructural de uniones soldadas y modelos de propagación de grietas para la gestión de vida en estructuras

State of the art in structural integrity of welded joints and crack models for structures life management

Oscar Javier Araque de los Ríos¹ Nelson Arzola de la Peña²

Recibido 18 de junio de 2012, aceptado 8 de marzo de 2013

Received: June 18, 2012 Accepted: March 8, 2013

RESUMEN

La soldadura es una de las técnicas más utilizadas para la unión de elementos estructurales, y presenta múltiples beneficios en su aplicación. Sin embargo, es usual encontrar algunos defectos en los elementos soldados, debido a los regímenes de temperatura usados en el momento de su deposición, los esfuerzos por contracción que se generan en el enfriamiento y la aparición de inclusiones, porosidades y grietas de solidificación, entre otros. Este artículo de revisión explica aspectos relacionados con el análisis de esfuerzos, detección de defectos, e influencia de la geometría de los cordones de soldadura. Además, se revisan y discuten las investigaciones de distintos autores en cuanto al análisis de la integridad de uniones soldadas, desde la perspectiva de la Mecánica de la Fractura, se presentan los criterios relacionados con la estimación de la resistencia residual de una estructura (capacidad de resistencia en presencia de grietas o defectos estructurales) y el mecanismo de propagación de grietas en el cordón. Se indican, así mismo, los protocolos de gestión de vida en soldaduras que involucran factores como la carga, resistencia del material, tamaño del defecto y de las posiciones asumidas de las variaciones estadísticas en circunstancias reales, las cuales sirven para estimar la vida de las uniones soldadas. Se incluyen los resultados de investigaciones en cuanto al análisis de diversas situaciones de carga y tipos de unión soldada.

Palabras clave: Unión soldada, mecánica de la fractura, modelos de propagación de grietas, fatiga, integridad estructural.

ABSTRACT

Welding is one of the techniques used for joining structural elements, and has many benefits in its application. However, it is usual to find some flaws in the welding elements due to temperature regimes at the time of its deposition, stresses that are generated by contraction in cooling and the appearance of inclusions, porosity and solidification cracking among others. This review article explains the issues related to the stress analysis, defect detection and the influence the geometry of a weld joint. Also, the life management protocols in welds, that involve factors such as load, material resistance, size of the defects and the assumed positions of the statistical variations under real circumstances, which are useful to estimate the life of the welded joints, are included. The results of research work related to the analysis of different loading conditions and types of welded joints are included.

Keywords: Welded joint, fracture mechanics, cracks propagation models, fatigue, structural integrity.

¹ Grupo de Investigación Desarrollo Tecnológico. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Ibagué. Ibagué, Colombia. E-mail: oscar.araque@unibague.edu.co; ojaraque@yahoo.com.mx

² Grupo de Investigación en Diseño Óptimo Multidisciplinario. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. E-mail: narzola@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos más eficaces para la unión de estructuras de acero es mediante el proceso de soldadura. Aunque la soldadura tiene muchas ventajas, también posee algunas desventajas como son las deformaciones, las tensiones residuales y los defectos propios del método de soldadura. Los defectos en las soldaduras son esas imperfecciones o discontinuidades producidas fundamentalmente por la existencia de fallas metalúrgicas o discontinuidades geométricas tales como inclusiones de escoria, porosidades, grietas de solidificación, socavaciones, falta de penetración, fusión incompleta, contracciones y grietas inducidas en frío o en caliente por esfuerzos residuales.

Muchos de los cambios metalúrgicos, geométricos y superficiales, sucedidos en la soldadura, son producto de diversas causas como el aumento de la velocidad de depósito en la geometría del charco de soldadura, el efecto de la polaridad de la corriente, la extensión y diámetro del electrodo. Además, los factores anteriormente mencionados modifican la tasa de fusión, el tamaño de grano y la penetración de la soldadura por arco sumergido [1]. Otros estudios se han realizado alrededor de esta temática, La investigación de Flores [2] presenta un método para el análisis de los procesos de fisuración de materiales dúctiles, argumentando que el micromecanismo de falla más común en aleaciones de elevada tenacidad, es la coalescencia de microcavidades. Este autor emplea el modelo propuesto por Gurson con el fin de reproducir el proceso de fisuración. Para ello incorpora el efecto de los esfuerzos hidrostáticos en la superficie de fluencia y advierte sobre la aparición de una componente dilatadora para la deformación plástica. Este modelo puede calibrarse de manera simple para simular situaciones complejas que se salen del ámbito de aplicabilidad de la Mecánica de la Fractura clásica; aunque es aplicable únicamente a situaciones en las que el micromecanismo de fractura es la coalescencia de microvacíos. Se reporta que los resultados numéricos tienen buena correspondencia con las mediciones experimentales.

Además del conocimiento teórico sobre los mecanismos de generación y propagación de defectos, es necesario establecer herramientas para lograr evaluarlos. En un trabajo de Lotsberg [3] se proponen fundamentos para la determinación de factores de

concentración de esfuerzos, en soldaduras a tope, de estructuras de secciones tubulares, pilotes de cimentación, tuberías y estructuras de bóveda. Su trabajo consiste en la evaluación del espesor de la placa, en la zona de afectación térmica en el material y las tolerancias de fabricación, para aumentar la resistencia a fatiga en la zona de influencia térmica. En este trabajo la fatiga es producida por la flexión local cuando las placas son sometidas a carga en un plano.

La investigación realizada por Bao [4] establece un método para el cálculo de los esfuerzos térmicos residuales en placas soldadas a filete longitudinalmente. En este trabajo se evalúan las tasas de crecimiento de grietas debido a la fatiga, utilizando los métodos de la Mecánica de la Fractura y la ley de superposición para la obtención del factor de intensidad de esfuerzos. En el trabajo se estableció un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales que representan la relación entre los esfuerzos residuales y el factor de intensidad de esfuerzos residuales. Este método puede ser empleado para los casos en que el camino de crecimiento de la grieta es perpendicular a la soldadura, y la influencia de los esfuerzos residuales longitudinales es más importante que los cambios en la microestructura del cordón soldado.

En [5] se ha utilizado la Mecánica de la Fractura y la simulación micromecánica para evaluar la eficacia, en la predicción de la capacidad de deformación de las soldaduras de filetes estructurales con fisuras. El modelamiento de uniones soldadas también ha sido utilizado por distintos investigadores para analizar el comportamiento de las soldaduras en diversos escenarios, tal es el caso del diseño de componentes estructurales soldados en navíos. Los investigadores Traidia y Roger [6] presentan el desarrollo de un modelo numérico utilizando el método de los elementos finitos para describir la transferencia de calor, flujo del charco de soldadura y los campos electromagnéticos presentes en el proceso Tungsten Inert Gas (TIG). El modelo involucra el cátodo, el arco de plasma y la fusión de ánodos juntos; y se resuelve en un formalismo dependiente del tiempo, teniendo en cuenta las corrientes de Foucault. Para validar el modelo, se utiliza una cámara de rayos infrarrojos que registra la dinámica de la superficie del charco de soldadura. Un algoritmo de procesamiento de imágenes permite

obtener la evolución temporal del ancho del charco de soldadura directamente desde la grabación de video. El modelo numérico desarrollado fue aplicado a la soldadura de acero inoxidable AISI 304. Los resultados de la simulación mostraron que el efecto Marangoni juega un papel importante en la dinámica del charco de soldadura. A partir del modelo se explica la formación de vórtices, considerando una superficie con coeficiente de tensión dependiente de la temperatura y la presencia de azufre. Estos vórtices juegan un papel fundamental en la evolución temporal de las dimensiones del charco de soldadura. Para las condiciones de este estudio se observa que la influencia de la tensión superficial disminuye en favor de las fuerzas de Lorentz. Una comparación entre los pulsos de corriente de soldadura muestra que las fuerzas son energéticamente equivalentes. La investigación concluye que para un determinado nivel de energía, es más conveniente el uso de corriente pulsante de soldadura para soldar chapas de mayor dimensión. Estas predicciones están de acuerdo con los resultados experimentales desarrollados en la investigación.

En [7] se realizó un estudio computacional por elementos finitos donde se estudió la incidencia de la rugosidad en la propagación subcrítica de grietas. El modelo estima la tasa de propagación de grietas considerando las múltiples deflexiones de la punta de grieta, concluyendo que este fenómeno es significativo en los procesos de fatiga. El trabajo obtiene una buena correlación en los resultados obtenidos. Aunque, se sugiere realizar estudios experimentales adicionales empleando topografía 3D para una mejor comparación cuantitativa.

En la investigación realizada por Chin y colaboradores [8] se estudió el efecto de la geometría de soldadura sobre la resistencia a la fatiga de juntas soldadas a filete, utilizando probetas de geometría cruciforme. Dicha geometría se varió intencionalmente, y se encontró que la resistencia a la fatiga aumenta gradualmente con el aumento del ángulo de flanco de soldadura y radio de punta de soldadura. Se concluye además, que el espesor de garganta de soldadura posee poca influencia en la vida de fatiga.

En [9] se caracterizaron y determinaron las propiedades mecánicas de juntas soldadas a filete mediante microscopía, utilizando la técnica de microscopía electrónica de barrido y de transmisión.

También, se realizaron pruebas de dureza y pruebas de propiedades mecánicas como el ensayo de tensión para la caracterización de los cordones de soldadura y la determinación, ubicación y tasa de dispersión de los defectos.

Otros investigadores han estudiado las soldaduras de punto o contacto, obteniendo caracterizaciones y comportamientos para este tipo de soldadura. En [10, 11] se estudió el comportamiento a la fatiga de soldaduras de punto, utilizando modelos de elementos finitos. En [12] se propuso un modelo de crecimiento de grieta por fatiga, en [13] se realizó un estudio analítico donde se evaluó el comportamiento para vibración y pandeo. Mientras que, en la investigación [14] se utilizaron métodos ópticos para la determinación de defectos en esta clase de soldaduras.

El desarrollo del presente artículo pretende vincular los diversos aspectos relacionados con el análisis de esfuerzos, detección de defectos, modelamiento de propagación de grietas de fatiga y la influencia del tipo de proceso utilizado, además de la geometría de los cordones en uniones soldadas.

DEFECTOS EN UNIONES SOLDADAS

La mayoría de los defectos en uniones soldadas son del tipo porosidad, falta de penetración, falta de fusión, inclusión de escoria, socavación y desalineamiento [15]. El tamaño e intensidad de las imperfecciones depende del proceso de soldadura, la geometría, la facilidad de acceso, y el cuidado ejercido en el proceso de soldar, entre otros factores. Estas imperfecciones tienen diferentes características y en algunas situaciones son difíciles y costosas de detectar y definir sin destruir la junta soldada. Se plantean defectos originados por el proceso que inducen la aparición de grietas de fatiga. Esto se atribuye al hecho de que para una vida de fatiga dada, las imperfecciones incluidas pueden ser mejor toleradas que las imperfecciones de la superficie [16]. Varias de estas imperfecciones en las soldaduras son descritas por Maddox [15] como se muestra en la Figura 1.

Existen diversos tipos de defectos en las uniones soldadas, debido a factores como la intensidad de corriente, el medio y factores humanos que afectan la calidad del depósito soldado. Los defectos

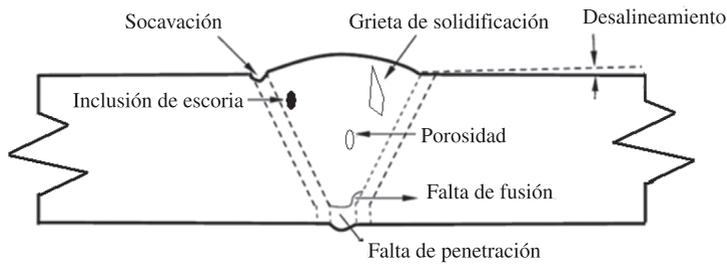


Figura 1. Imperfecciones de soldadura en juntas a tope. Adaptada de [15].

tipo grieta de solidificación en soldadura pueden influenciar significativamente de manera local el campo de tensiones en la región de la soldadura, cuando el componente soldado es sometido a carga cíclica [17].

En la mayoría de los casos, los defectos en las soldaduras conducen a la aparición de concentradores de esfuerzos altos que aceleran el crecimiento de grietas por fatiga. En la investigación [18] se estudió el efecto de la falta de penetración (lack of penetration) (LOP) y falta de fusión (lack of fusion) (LOF) en el comportamiento a fatiga de una aleación de aluminio Al-5083-0 empleada en una soldadura doble-V de extremo ranurado, obtenida mediante el proceso de soldadura por gas inerte (MIG). Ellos concluyeron que el defecto por falta de penetración (LOP) puede reducir seriamente la vida a fatiga de la unión soldada, tanto para soldaduras con refuerzo intacto como para aquellas con el refuerzo removido. También, determinaron que el defecto LOF es menos crítico que el defecto LOP. Sanders [18] también reportó que el efecto de las discontinuidades interiores es mínimo en el desarrollo de fatiga en soldaduras que poseen refuerzo. El efecto del refuerzo en la soldadura es tan marcado que solo los defectos críticos afectan el comportamiento a fatiga y esto se relaciona con la pérdida de área en la sección de la garganta de soldadura. Las porosidades sólo se vuelven un factor negativo significativo cuando el refuerzo es removido.

La investigación [19], en torno al estudio de la vida a fatiga en uniones soldadas ha establecido que esta comprende dos fases, el inicio de grieta y la propagación de la grieta. En especímenes microestructuralmente uniformes, la fase de iniciación de grieta comprende una parte considerable de

la vida total, pero, para estructuras soldadas, la presencia de imperfecciones como las inclusiones de escoria en pie de soldadura, socavaciones, esfuerzos residuales, falta de penetración, desalineamientos, etcétera reducen efectivamente la fase de iniciación [20]. Todas las juntas soldadas contienen pequeñas inclusiones de escoria en pie de soldadura [21], con defectos preexistentes como microgrietas que provocan concentradores de esfuerzos. La propagación estable de grietas por fatiga comienza en estas inclusiones muy temprano en la vida útil. Las juntas soldadas también contienen “cierres” debido a los esfuerzos residuales causados por el ciclo térmico del proceso de soldadura, que influyen en la propagación de grietas por fatiga.

Los concentradores de esfuerzos locales influyen la propagación de grietas por fatiga. El resultado del estudio [22] indicó que la duración de la vida de propagación estable de grietas fue de 75% a 89% del total de la vida, para todos los tipos de juntas estudiadas. De ahí que, para las juntas soldadas, la vida total puede asumirse como dominada por la etapa de propagación. En otra investigación [23] se encontró que las imperfecciones de las uniones soldadas reducen de manera significativa la vida al aumentar la velocidad de propagación de grietas por fatiga. En este trabajo se tuvo en cuenta el efecto de los esfuerzos residuales, y las propiedades mecánicas del material base, el cordón de soldadura, así como la zona de afectación térmica. Se observó que la influencia negativa de los defectos tipo grieta de solidificación y el socavamiento es mayor a los provocados por los defectos tipo porosidad. Un mejoramiento de la geometría del perfil del cordón disminuye el efecto de la concentración de esfuerzos, incrementando la resistencia a fatiga. Otra conclusión interesante es que los tratamientos superficiales, como

el granallado, no mejoran sustancialmente la resistencia a fatiga de la unión soldada.

En la actualidad son ampliamente aceptados los criterios de diseño y explotación que contemplan soldaduras con imperfecciones; bajo estos criterios, las soldaduras sólo necesitan ser reparadas si su presencia es peligrosa para la integridad de la estructura [15]. La integridad de las estructuras soldadas se estima con la vida a fatiga de la junta soldada conteniendo imperfecciones, y comparándola con la vida requerida. Por lo tanto, muchas investigaciones hacen un esfuerzo por encontrar el efecto dañino de los defectos en la soldadura.

Detección de defectos en soldaduras

Diversas técnicas son utilizadas para la inspección y detección de defectos en uniones soldadas. Entre ellas se pueden mencionar como fundamentales la inspección visual, rayos X, partículas magnéticas, tintas penetrantes, ultrasonidos, entre otras.

La investigación [24] utilizó la técnica de reflexión ultrasónica para la detección de defectos planos en soldaduras de aceros inoxidables austeníticos, el estudio concluye que las leyes de reflexión de onda ultrasónica no se mantienen y la energía se refleja en direcciones inesperadas. Lo anterior tiene consecuencias importantes para las técnicas de inspección ultrasónica, ya que dependen de señales especulares para la detección de defectos. En esta investigación un rayo que traza el acercamiento de la señal ultrasónica es usado para estudiar los patrones de comportamiento de reflexión para varios tipos de defectos de soldadura y varias ubicaciones y orientaciones. En general el haz ultrasónico tendrá que viajar primero a través del material base para alcanzar el material de la soldadura austenítica, provocando una fuerte señal especular. La señal reflejada generalmente ocurre cerca de las direcciones esperadas excepto por olas de distorsión verticalmente polarizadas. Además, para un tipo determinado de soldadura es útil minimizar la intensidad del haz ultrasónico.

En el estudio realizado por Tabatabaeipour y Honarvar [25] se hicieron ensayos de tipo ultrasónico en soldadura sobre acero austenítico para dos diferentes clases de procesos, la soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) y la soldadura por arco con gas inerte y electrodo de tungsteno (GTAW), mientras

que la técnica de ultrasonido utilizada en la prueba fue la de tiempo de difracción de vuelo (ToFD). Dentro del procedimiento experimental se indujeron defectos artificiales en el proceso, en los dos tipos de soldaduras ensayadas. Los resultados mostraron un comportamiento anisotrópico en el proceso GTAW, mientras que las probetas soldadas con el proceso SMAW presentaron un comportamiento isotrópico, lo anterior debido a los cambios microestructurales producto de los procesos. Por otra parte, la atenuación de amplitudes de eco es mayor en las probetas soldadas por el proceso GTAW. Las muestras se examinaron por la técnica de ultrasonido ToFD en condiciones idénticas obteniéndose imágenes B-scan. Se concluyó que la técnica de inspección por ultrasonido para la muestra preparada por el proceso SMAW es más adecuada que la realizada por el proceso GTAW debido a una mayor dispersión de las ondas en el segundo. Las mediciones también mostraron que la forma en que la sonda es colocada es muy importante en la técnica de detección de defectos cuando se utiliza la técnica ToFD.

En otros estudios como [26] se explora el desarrollo de un sistema automatizado para analizar defectos por soldadura detectados en radiografías. Se describe un estudio de clasificadores de patrón no lineal, implementado por redes neuronales, para clasificar defectos existentes en cordones de soldadura por la técnica radiográfica, destinada principalmente a aumentar el porcentaje de éxito de reconocimiento de defectos obtenido con los clasificadores lineales. Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron patrones radiográficos del Instituto Internacional de Soldadura (IIW). Algunas funciones geométricas de defectos fueron utilizadas como datos de entrada de los clasificadores. Se aplicó un criterio de relevancia neuronal para evaluar la capacidad de discriminación de las clases de funciones consideradas. Lo anterior con la finalidad de demostrar que la calidad de las características geométricas utilizadas es más importante que la cantidad de funciones empleadas. La técnica de análisis de los componentes principales de discriminación no lineal, también desarrollado por redes neuronales, es utilizada para mostrar el problema de la clasificación en dos dimensiones, así como para evaluar el rendimiento de la clasificación obtenida con estas técnicas. Otras investigaciones como [27] exponen que las imágenes de soldadura por rayos X contienen ruido incierto al igual que los defectos dentro de ellas, las cuales poseen bajo

contraste en su fondo, por lo cual son difíciles de detectar. En esta investigación se localizaron y segmentaron los defectos de la línea de imágenes de rayos X. Primero, se presentó un enfoque para extraer características de imágenes de rayos X con múltiples umbrales; se usa el apoyo de una máquina vectorial (SVM). Luego se utilizó la transformación de Hough para quitar los píxeles ruidosos en la región de defecto grueso cuando el defecto fue localizado. Los resultados experimentales mostraron que el enfoque propuesto es efectivo y factible para localizar defectos en imágenes de rayos X de soldaduras ruidosas y con bajo contraste.

INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LAS UNIONES SOLDADAS DESDE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA

Conforme al estudio realizado por [28], la tolerancia al daño se define como la capacidad que posee una estructura para soportar cargas estáticas y/o cíclicas derivadas de su vida en servicio, en presencia de daño, producidos por fatiga, condiciones ambientales (corrosión, por ejemplo) o causas accidentales, hasta que dicho daño sea detectable mediante inspección. El objetivo de las inspecciones es la detección del daño antes de que alcance un tamaño crítico, momento en el cual la estructura es incapaz de soportar las cargas y se produce la falla estructural. La Mecánica de la Fractura es la ciencia que estudia estos fenómenos, en particular la resistencia residual; la cual se define como la capacidad resistente estructural considerando la presencia de grietas o defectos, el crecimiento de esos defectos o grietas ante cargas estáticas o cíclicas y el tamaño crítico de dichos defectos o grietas. Los esfuerzos nominales normalmente son determinados por métodos convencionales de diseño. Estos afectan la resistencia a la fractura frágil, reduciendo la capacidad de carga de la estructura.

Otra variable importante en mecánica de la fractura es el tamaño de la grieta. Si una estructura estuviese completamente libre de grietas, la inestabilidad frágil no sería posible y las consideraciones de la mecánica de la fractura no podrían ser tomadas en cuenta. Sin embargo, los materiales de ingeniería no están libres de defectos tipo fisuras o de otro tipo. Entonces, lo más conveniente para disminuir la severidad de los defectos, es mejorar los procesos de manufactura para reducir su presencia y cantidad, a fin de que el factor de intensidad de esfuerzos

sea mucho menor que la tenacidad a la fractura del material (K_{IC}). Para efectos del control del tamaño existente de las fisuras, se debe usar un método de ensayo no destructivo. La inspección puede ser usada para promediar la medida de la posible fisura en la estructura.

Otro parámetro a considerar en Mecánica de la Fractura es la tenacidad a la fractura del metal base y el material de soldadura. Con un mayor valor de K_C o K_{IC} , tamaños de fisura más grandes y/o esfuerzos nominales mayores pueden ser tolerados sin iniciación de una inestabilidad frágil.

Los valores específicos de K_C o K_{IC} , para materiales de aporte en soldadura, no se encuentran disponibles con facilidad en la literatura. Sin embargo, se puede usar el ensayo de impacto Charpy para estimar mediante ecuaciones empíricas la tenacidad a la fractura de algunos metales de aporte en soldadura [29].

Otro aspecto a tener en cuenta, cuando se aplican criterios de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica (L.E.F.M.) a una estructura soldada, es la variación de la tenacidad a la fractura en la zona afectada por el calor debido a las variaciones microestructurales.

En las estructuras soldadas también se debe considerar la influencia de los esfuerzos residuales en la integridad estructural. En la mayoría de los casos, el campo de esfuerzos residuales no está muy bien definido, por lo tanto en estos casos la L.E.F.M. no tiene una metodología de aplicación bien establecida, en parte producto de la complejidad de implementación [29].

Existen otros autores que han evaluado la integridad de uniones soldadas. En [30] se realizó un estudio del efecto de la heterogeneidad mecánica y del límite de carga, en una junta de soldadura con una grieta longitudinal, en la evaluación de la integral J y de la curva de falla. Para ello, fue utilizado el método de los elementos finitos considerando un modelo elastoplástico. Los resultados indicaron que los valores de la integral J, para las curvas de falla de la prueba, se ven muy afectados por el factor de carga. En la investigación [31] se analizó la resistencia a la fractura, en ensayos de tracción de uniones realizadas sobre fundición dúctil usando soldadura oxiacetilénica con dos tipos de varilla de fundición

laminar y también usando soldadura SMAW con electrodos de Fe-Cr-Ni y de Ni-98,4%. Las soldaduras se llevaron a cabo con y sin precalentamiento, con el fin de evaluar la influencia del precalentamiento sobre la resistencia de la unión. Los resultados obtenidos mostraron como las soldaduras realizadas con varilla de fundición presentan una característica resistente muy inferior a las de la fundición original sin mejorar su comportamiento dúctil. Por otra parte, las realizadas con Fe-Cr-Ni o Ni presentaron una resistencia mucho más elevada, aunque inferior a la original, pero con una gran mejora de la ductilidad. Las propiedades resistentes se relacionan también con la microestructura obtenida en el cordón para cada material de aporte. En el estudio [32] se desarrolló una solución analítica del factor de intensidad de esfuerzo de soldaduras por puntos en especímenes de diferentes materiales y espesores. Las soluciones para los esfuerzos estructurales, la intensidad de esfuerzo y el análisis de la integral J fueron obtenidas en función de la carga aplicada, las propiedades mecánicas del material y los parámetros geométricos de la soldadura y la muestra. Las soluciones para los esfuerzos y el factor de intensidad de esfuerzos fue validado por los resultados de los análisis utilizando el método de elementos finitos 3D, para un punto de soldadura por fricción con la geometría ideal y un punto de soldadura por fricción con geometría compleja.

Investigaciones y antecedentes en el estudio de la propagación de grietas

Diversos estudios se han realizado para explicar la propagación de grietas en uniones soldadas, por ejemplo. Mammoli y colaboradores en su investigación [33] utilizaron el método de los elementos de contorno para investigar el efecto de los defectos en la propagación de una grieta en la interfaz entre dos materiales elásticos e isotrópicos. El estudio reveló que los defectos tienden a desviar las grietas al acercarse a la interfaz, entre los materiales, de su trayectoria original, si la distancia entre el defecto y la punta de grieta es pequeña con relación al tamaño del defecto. Se demostró también que los materiales con defectos interfaciales tienen una tendencia significativamente mayor a desviar las grietas, a lo largo de la interfaz, en comparación con los materiales que no presentan este tipo de defectos. En la investigación [34] se estudió la influencia del tamaño de la soldadura sobre la fatiga y las características del crecimiento

de grietas para soldaduras por arco, con núcleo de fundente (FCAW), empleando probetas de geometría cruciforme, que poseen como defecto la falta de penetración. Los experimentos de propagación subcrítica de grieta se llevaron a cabo en una dirección vertical, con amplitud de carga constante. Las tasas de crecimiento de grieta se encontraron dependientes, principalmente de los cambios en la microestructura de la soldadura. En otros estudios, como [35], se analizó la estructura local y la distribución de dureza en soldadura por puntos, utilizando un modelo computacional compuesto por un metal base, una zona de afectación térmica y la capa adhesiva. En el estudio se ha tenido en cuenta la falta de homogeneidad de las propiedades mecánicas en la soldadura. Como resultado se obtuvo que en el borde de la soldadura ocurrió la mayor concentración de esfuerzos.

Otros investigadores han direccionado sus estudios sobre soldaduras, al establecimiento de los mecanismos de falla y a la predicción del crecimiento de grietas. En [36] se realizó un estudio de predicción de crecimiento de grieta por análisis no lineal, de un sólido elastoplástico. En este trabajo se introdujo un radio variable de la zona plástica en el frente de grieta; y se propuso el criterio de los esfuerzos principales máximos para la dirección de inicio de propagación de la grieta, debido a que coincide con la dirección perpendicular del esfuerzo máximo. La velocidad de propagación de la grieta por fatiga fue calculada como una función del rango del factor equivalente de intensidad de esfuerzos. El modelo de crecimiento de la grieta propuesto se compara con los resultados experimentales obtenidos utilizando el criterio de esfuerzo principal máximo. El estudio [37] establece la distribución de los esfuerzos residuales y la tasa de crecimiento de la grieta por fatiga de soldaduras en tubos de acero inoxidable, para la zona de fusión de soldadura, el análisis óptico mostró una microestructura celular dendrítica con islas de ferrita en una matriz austenítica. El análisis de esfuerzos residuales mostró un alto esfuerzo de tracción en la región del centro de la soldadura y esfuerzos de compresión en la zona afectada por el calor. Las propiedades de tensión y la tasa de crecimiento de fisuras por fatiga se midieron a lo largo y a través de la dirección del espesor de la soldadura. Los ensayos de tracción mostraron mayor resistencia en la zona de fusión de la soldadura y en la zona afectada por el calor

en comparación con la del metal base. Además, la tasa de crecimiento de las grietas hallado fue varias veces mayor en la región interna de la soldadura que en la región externa.

Protocolos de gestión de vida en estructuras soldadas y modelos predictivos de mecánica de la fractura

De manera general, la mayoría de los eventos de fallas peligrosas en estructuras que soportan cargas están asociados con la fractura. La fractura ocurre cuando una carga externa excede la resistencia del material a la falla. La relación entre la carga y la resistencia de un material está fuertemente influenciada por la presencia de defectos, entre los cuales las imperfecciones del tipo grieta son las más perjudiciales. En lo que concierne a un programa de gestión de vida, se debe tener en cuenta que los factores clave correspondientes a la carga, resistencia del material, el tamaño del defecto y de las posiciones asumidas en las variaciones estadísticas en circunstancias reales, pueden ser cuantificados en un formato probabilístico [38].

La confiabilidad de los componentes de trabajo pesado en el área nuclear, petroquímica, aeronáutica, naval o de la industria automotriz, puede ser abordada con base a dos diferentes puntos de vista de ingeniería. En el primero, el punto de vista tradicional, el objetivo es garantizar una vida “segura” bajo las circunstancias operacionales prescritas. Este enfoque ha sido desarrollado para la predicción de una vida útil segura bajo daño progresivo acumulado inducido por fatiga, corrosión, termofluencia, irradiación, desgaste o envejecimiento natural [39]. Para este caso se aplican factores para determinar experimentalmente la resistencia a la falla en función de garantizar una vida de operación segura. La aplicación de este enfoque, ampliamente usado en la actualidad en la ingeniería convencional, implica el retiro o el reemplazo de los componentes o las estructuras cuando el tiempo de vida seguro es alcanzado. El producto construido con fiabilidad está basado solamente en la inspección realizada durante la fabricación, para asegurar que tenga una calidad “libre de defectos” antes de su puesta en operación.

Desafortunadamente, en la práctica ingenieril actual lo anterior es difícil de garantizar. Resaltándose el hecho de que muchas fallas catastróficas,

especialmente en el campo aeroespacial, han resaltado la inconsistencia del procedimiento de tiempo de vida seguro [40-41].

Como resultado, un segundo tipo de filosofía de diseño, fabricación y mantenimiento ha surgido en la industria de alta tecnología, la cual pone énfasis en la operación segura de sistemas mecánicos, aun con presencia de defectos. Estos últimos pueden existir desde el inicio o desarrollarse por daño acumulativo durante la operación. Esta nueva filosofía de ingeniería está enfocada en la “tolerancia al daño”, dentro de los intervalos de tiempo establecidos, entre las inspecciones durante el servicio. Bajo esta perspectiva, los intervalos de inspección dictan la reparación o el retiro de los componentes dañados o bien de la estructura completa. La confiabilidad del producto puede así ser manejada a unos costos más bajos. De manera que el enfoque basado en la tolerancia al daño reconoce que el riesgo de falla no puede ser completamente eliminado. Sin embargo, sí permite contribuir para minimizar el riesgo de la falla a niveles tolerables (probabilidades de falla entre 10^{-4} y 10^{-6}), debido a la combinación del conocimiento, razonamiento del diseñador y del personal de producción y aseguramiento de la calidad. La confiabilidad de la inspección, junto con la cuantificación del riesgo de falla, juega un papel central en la aplicación exitosa de la filosofía de la tolerancia al daño.

La filosofía de la tolerancia al daño se incorpora fácilmente a la Mecánica de la Fractura Probabilística. El riesgo de falla es cuantificado en términos de la probabilidad de falla por año de operación [42-43]. La decisión de reparar o retirar un elemento se hace con base a la evaluación probabilística del riesgo de falla. Lo anterior representa un mayor avance en comparación con la declaración “sí-no” propia del enfoque tradicional y del criterio asociado de aceptación “sí-no” de los ensayos no destructivos.

En la Figura 2 se muestra la base del riesgo de falla mecánica teniendo como ingrediente clave a la Mecánica de la Fractura Probabilística. En esta síntesis se recogen las contribuciones de varios campos de la ingeniería en la determinación de la probabilidad de falla de un componente.

En el diagrama anterior se aprecia que las estadísticas de carga, por ejemplo, análisis de patrones de

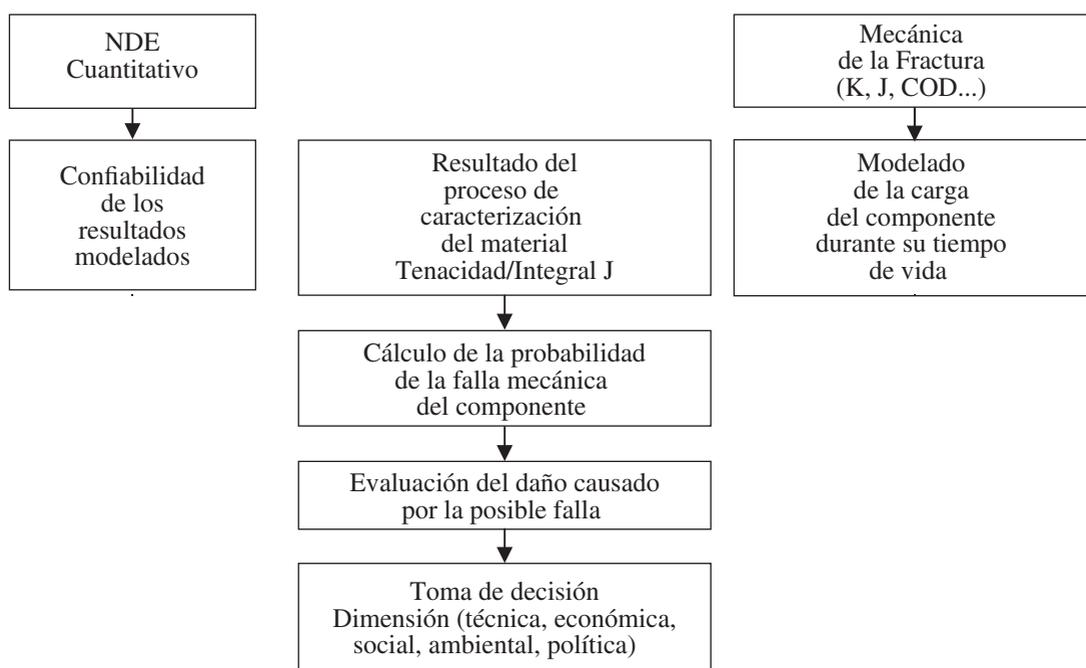


Figura 2. Diagrama de flujo del programa de inspección basado en el riesgo. Adaptado de [44].

cargas aleatorias, confiabilidad de las pruebas no destructivas y la dispersión estadística de la resistencia del material son parámetros de entrada necesarios para modelar fallas potenciales. Esta lógica general tiene distintas características cuando está relacionada con la fractura dúctil / frágil o con el daño acumulado debido a la fatiga, corrosión, desgaste, termofluencia o radiación. También se deben tomar decisiones acerca del nivel de riesgo aceptable. Esta última tarea está fuertemente influenciada por la naturaleza del producto y sus circunstancias operacionales que son una cuestión que involucra problemas globales de tipo técnico, económico, social y político [44].

En el estudio [45] se presenta una simulación detallada, utilizando el método de los elementos finitos para analizar soldaduras longitudinales por haz de electrones. En la investigación [46] se estudió el daño debido a la deformación por fluencia lenta (*creep*), en tuberías soldadas, sometidas a presión interior, utilizando el método de los elementos finitos. Se incorpora el efecto de la degradación de los materiales con el tiempo debido a reparaciones y los esfuerzos residuales debido al ciclo térmico. El análisis se realizó sometiendo el modelo a carga axial y variando la profundidad de la reparación.

Se concluyó que el daño estructural se origina en los sectores que han sido reparados. Se reporta también que las grietas se presentan por debajo de la superficie de la tubería y evolucionan con el tiempo hasta la superficie.

En la investigación [47] se analizó el esfuerzo de fatiga de bajo ciclaje, para uniones soldadas en perfiles H e I con placa de refuerzo, en los que las soldaduras a tope y filete cooperan en la transmisión de la carga. El enfoque adoptado se basó en el modelamiento del estado de deformación en el pie de la soldadura. El comportamiento local de esfuerzo-deformación elastoplástica en la raíz de la muesca se evaluó empleando la regla de Neuber y se obtuvieron curvas de carga-vida mediante la ecuación basada en la fórmula de Langer. Se concluyó que la anisotropía del material desarrollada durante el primer ciclo de deformación plástica en el área de la entalla conduce, luego de producirse la descarga, a la aparición de un ciclo de esfuerzos plásticos totalmente reversible. Lo anterior conduce a que el agrietamiento ocurra después de un pequeño número de ciclos de carga.

En el estudio [48] se determinó el crecimiento de grietas por fatiga en tubos de acero inoxidable austenítico, soldados mediante el proceso GTAW.

El análisis se realizó utilizando la Ley de Paris y las constantes, para el material base y la unión soldada, se determinaron experimentalmente conforme a la norma ASTM E647. Los experimentos fueron llevados a cabo para predecir el crecimiento de la grieta a fatiga en la superficie exterior de los tubos soldados. Se observó que el tamaño de grieta crece de manera proporcional al número de ciclos de carga. Los resultados obtenidos fueron comparados con los alcanzados para tubos soldados por proceso SMAW.

En [49] se realizó un análisis tridimensional por elementos finitos de especímenes soldados sometidos a la prueba de impacto Charpy. Para el modelamiento de los especímenes se varió la orientación de la soldadura. Se concluye que la respuesta del material se rige por una ecuación constitutiva elasto-viscoplástica (plástico sólido poroso). Esta expresión toma en consideración la geometría de la soldadura, las propiedades mecánicas de la zona de afectación térmica y el metal base. En el estudio [50] se predice la vida a fatiga de bajo ciclo, para juntas soldadas por puntos, basándose en la distribución de microdureza y resistencia mecánica, en las diferentes zonas de la periferia de la soldadura a tope. El análisis se realizó utilizando el *software* ANSYS y se llevó a cabo para un solo punto. La relación entre la microdureza, el esfuerzo y las constantes cíclicas del material, de las diferentes zonas, en la periferia de la soldadura por puntos, se determinan conforme a la distribución de la dureza, así como los parámetros relacionados con la fatiga en el material base. Utilizando los esfuerzos locales y los esfuerzos obtenidos del análisis de elementos finitos, se predijo la vida a la fatiga en la soldadura por puntos, aplicando la ecuación de Morrow Manson-Coffin y la ecuación de Smith-Watson-Topper. Los resultados de predicción de vida mostraron buena concordancia con los datos experimentales en régimen de fatiga de bajo ciclo.

CONCLUSIONES

Los defectos tipo grieta de solidificación, en soldadura, influyen significativamente el campo de tensiones de la soldadura cuando el componente soldado es sometido a una carga cíclica.

El defecto por falta de penetración (LOP) puede reducir significativamente la vida a fatiga de la unión soldada, mientras que el defecto por falta de fusión (LOF) es menos crítico.

Los métodos de análisis numérico han contribuido, en gran medida, a la comprensión del papel de las tensiones residuales en piezas soldadas. En forma particular, el método de los elementos finitos (FEM) se ha convertido en una herramienta poderosa para el análisis de la vida residual y la integridad estructural de uniones soldadas con presencia de un campo de esfuerzos residuales.

La Mecánica de la Fractura se utiliza ampliamente para la determinación de mecanismos de falla y progresión de grietas en soldaduras, en combinación con métodos de gestión de vida, siendo muy útiles para estimar la vida en uniones soldadas de componentes estructurales.

Se emplean en la actualidad una gran variedad de métodos para la inspección de uniones soldadas.

Entre todas ellas, la técnica de inspección ultrasónica brinda evidentes ventajas, aunque se requiere de equipamiento especializado y personal altamente capacitado para la interpretación de los resultados de esta técnica.

La calidad de la información obtenida, por medio de ultrasonido, está influenciada por el tipo de soldadura. Por ejemplo, el proceso de soldadura GTAW muestra una distribución anisotrópica, mientras que probetas soldadas con el proceso SMAW presentan un comportamiento isotrópico, debido a la orientación de los granos en el depósito soldado; esto hace que la detección de defectos en soldadura, utilizando métodos de ultrasonido, sea más sencilla en probetas soldadas por el proceso SMAW.

Los trabajos de investigación en esta área poseen una tendencia actual de estudiar el comportamiento a fatiga e integridad estructural de uniones soldadas obtenidas mediante distintas técnicas (ej.: SAW, SMAW, TIG, entre otras); y en la mayoría de los casos se analizan los materiales de ingeniería de mayor uso en aplicaciones estructurales, como son los aceros estructurales, aceros inoxidables, aleaciones de aluminio y las fundiciones dúctiles. Las investigaciones van encaminadas a modelar tanto la fase de iniciación como la de propagación estable de las grietas. Con frecuencia, estas también se centran en comprender cómo influye la geometría y las clases de defectos en la integridad estructural de

la unión soldada. Además, los esfuerzos residuales generados por el ciclo térmico son considerados un factor importante a tener en cuenta en los modelos numéricos.

En una amplia cantidad de trabajos los defectos son tratados como detalles geométricos que inducen concentración de esfuerzos que aceleran los mecanismos de iniciación y propagación de las grietas de fatiga. Los procedimientos actuales de modelamiento incluyen la generación de modelos geométricos empleando un mejor grado de detalle del cordón de soldadura y del material a unir, considerando la influencia que tienen el perfil del cordón, desalineación entre las partes y las variaciones de espesor, entre otros factores.

Se estima que en la próxima década las investigaciones en el área emplearán modelos computacionales de mayor complejidad, haciendo uso de la mecánica del medio continuo, mecánica de la fractura y el método de los elementos finitos. Varios de estos modelos con seguridad emplearán ecuaciones constitutivas que den cuenta de anisotropía localizada, gradientes de esfuerzos residuales mejor detallados y de las conexiones bifásicas entre los distintos elementos constitutivos de la unión. Todos estos resultados contribuirán a una mejor comprensión del comportamiento de las uniones soldadas, bajo cargas cíclicas y la presencia de defectos y concentradores de esfuerzos geométricos. Lo anterior posibilitará generar códigos de soldadura más precisos, donde se pueda establecer un criterio moderno de diseño de uniones soldadas basado en el fenómeno de la fatiga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo agradecen a la Dirección de Investigaciones de la Universidad de Ibagué y de la Universidad Nacional de Colombia, por su valiosa colaboración y aportes en el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] R.S. Chandel, H.P. Seow and F.L. Cheong, "Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 72, pp. 124-128. 1997.
- [2] R.M. Flores Le Roux. "Estudio de la propagación de fisuras en Materiales dúctiles". Tesis para optar al grado de doctor. Departamento de Motopropulsión y Termofluidodinámica Escuela técnica superior de ingenieros aeronáuticos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. Septiembre, 2002.
- [3] I. Lotsberg. "Stress concentrations due to misalignment at butt welds in plated structures and at girth welds in tubulars". *International Journal of Fatigue*. Vol. 31, pp. 1337-1345. 2009.
- [4] R. Bao and X. Zhang. "An inverse method for evaluating weld residual stresses via fatigue crack growth test data". *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 77, pp. 3143-3156. 2010.
- [5] A.M. Kanvinde, B.V. Fell, I.R. Gomez and M. Roberts. "Predicting fracture in structural fillet welds using traditional and micromechanical fracture models". *Engineering Structures*. Vol. 30, Issue 11, pp. 3325-3335. 2008.
- [6] A. Traidia and F. Roger. "Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 54, Issues 9-10, pp. 2163-2179. April, 2011.
- [7] N. Kamp, M.R. Parry, K.D. Singh and I. Sinclair. "Analytical and finite element modeling of roughness induced crack closure". *Acta Materialia*. Vol. 52, pp. 343-353. 2004.
- [8] L. Chin-Hyung, C. Kyong-Ho, J. Gab-Chul and L. Chan-Young. "Effect of weld geometry on the fatigue life of non-load-carrying fillet welded cruciform joints". *Engineering Failure Analysis*. Vol. 16, pp. 849-855. 2009.
- [9] W. Xiaoyuan, H. Hui, C. Ziyong, W. Wei, L. Congying and N. Zuoren. "Microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn-Zr-Er weld joints filled with Al-Mg-Mn-Zr and Al-Mg-Mn-Zr-Er weld wires". *Journal of Rare Earths*. Vol. 28, Issue 4, pp. 627-635. August 20, 2010.
- [10] M. Palmonella, M.I. Friswell, J.E. Mottershead and A.W. Lees. "Finite element models of spot welds in structural dynamics: review and updating". *Computers and Structures*. Vol. 83, pp. 648-661. 2005.

- [11] T. Van-Xuan and P. Jwo. "Analytical stress intensity factor solutions for resistance and friction stir spot welds in lap-shear specimens of different materials and thicknesses". *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 77, pp. 2611-2639. 2010.
- [12] S.H. Lin, J. Pan, P. Wung and J. Chiang. "A fatigue crack growth model for spot welds under cyclic loading conditions". *International Journal of Fatigue*. Vol. 28, pp. 792-803. 2006.
- [13] T. Biswajit and S. Suryanarayan. "Analytical studies for buckling and vibration of weld-bonded beam shells of rectangular cross-section". *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 51, pp. 77-88. 2009.
- [14] P.C. Lin, S.H. Lin and J. Pan. "Modeling of failure near spot welds in lap-shear specimens". *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 73, pp. 2229-2249. 2006.
- [15] S.J. Maddox. "Applying Fitness-for-Purpose Concepts to the Fatigue Assessment of Welded Joints". *The International Conference on Fatigue*. Vol. 1, pp. 72-81. Toronto, Ontario, Canada. 1994. In: S.J. Maddox. "Tips on Fatigue Design of Weldments". *The International Conference On Fatigue*. Vol. 2, pp. 19-27. Toronto, Ontario, Canada. 1994.
- [16] J.M. Barsom, "Fracture mechanics analysis of fatigue crack initiation and growth". *The International Conference on Fatigue*, pp. 88-98. Toronto, Ontario, Canada. 1994.
- [17] A. Mohammad Shah. "Structural integrity and fatigue crack propagation Life assessment of welded and weld-repaired structures". Thesis South Dakota school of mines and technology. USA. 2005.
- [18] W.W. Sanders and F.V. Lawrence. "Fatigue behavior of Aluminum alloy weldments". *Fatigue Test Weld. ASTM STP 648*. 1977.
- [19] P.J. Singh, B. Guha and D.R.G. Achar. "Fatigue tests and estimation of crack initiation and propagation lives in AISI 304L butt-welds with reinforcement intact". *Engineering Failure Analysis*. Vol. 10, pp. 383-393. 2003.
- [20] D.W. Berkovis and K. Di. "Consideration of the Effect of Residual Stresses on Fatigue Welded Aluminum Alloys Structures". *Journal of Fatigue & Fracture of Engineering Material and Structure*. Vol. 21, pp. 159-170. 1998.
- [21] G.E. Nordmark, W.C. Herbein and P.B. Dickerson. "Effect of Weld Discontinuities on Fatigue of Aluminum Butt Joints". *Journal of Welding*. Vol. 66, Issue 6, pp. 162-173. 1987.
- [22] R.D.S. Murthy, P. Gandhi and A.G. Madhava Rao. "A Model for Fatigue Prediction of Offshore Welded Stiffened Steel Tubular Joints Using FM Approach". *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. Vol. 4, Issue 3, pp. 241-247. 1994.
- [23] M.A. Wahab and M.S. Alam. "The significance of weld imperfections and surface peening on fatigue crack propagation life of butt-welded joints". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 153-154, pp. 931-937. 2004.
- [24] J.A. Ogilvy. "Ultrasonic reflection properties of planar defects within austenitic welds". *Ultrasonics*. Vol. 26, pp. 318-327. November, 1998.
- [25] S.M. Tabatabaeipour and F. Honarvar. "A comparative evaluation of ultrasonic testing of AISI 316L welds made by shielded metal arc welding and gas tungsten arc welding processes". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 210, pp. 1043-1050. 2010.
- [26] R.S. Romeu, L.P. Calóba, H.S. Marcio Siqueira and M.A. Rebello. "Pattern recognition of weld defects detected by radiographic test". *NDT&E International*. Vol. 37, pp. 461-470. 2004.
- [27] Y. Wang, Y. Sun, P. Lv and H. Wang. "Detection of line weld defects based on multiple thresholds and support vector machine". *NDT&E International*. Vol. 41, pp. 517- 524. 2008.
- [28] F.J. San Millán, I. Armendáriz, J. García Martínez, A. Salamanca y F. Martín de la Escalera. "Simulación por elementos finitos del comportamiento en tolerancia al daño de estructuras aeronáuticas". 8^{vo} Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. 2008.
- [29] T.F. Castillo Bustos. "Mecánica de la Fractura aplicada a soldadura utilizando computadoras". Tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. 1992.

- [30] Y.P. Lei, Y.W. Shi, H. Murakawa and Y. Luo. "The effect of mechanical heterogeneity and limit load of a weld joint with longitudinal weld crack on the J-integral and failure assessment curve". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 75, pp. 625-632. 1998.
- [31] C. Ferrer, F. Salas, P.A. Maita, J. Orozco y M. Pascual. "Resistencia a la fractura de la soldadura de fundición dúctil realizada con varillas de fundición laminar y con electrodos de Fe-Cr-Ni y de Ni, con y sin precalentamiento". *Anales de la Mecánica de Fractura*. Vol. 2, pp. 533-536. 2007.
- [32] T. Van-Xuan and P. Jwo. "Analytical stress intensity factor solutions for resistance and friction stir spot welds in lap-shear specimens of different materials and thicknesses". *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 77, pp. 2611-2639. 2010.
- [33] A. Mammoli, L. Graham, E. Reimanis and L. Tullock. "The effect of flaws on the propagation of cracks at bi-materials interfaces". *Great Britain*. Vol. 43, Issue 3, pp. 1149-1156. 1995.
- [34] V. Balasubramanian and B. Guha. "Influence of weld size on fatigue crack growth characteristics of flux cored arc welded cruciform joints". *Materials Science and Engineering*. Vol. A265, pp. 7-17. 1999.
- [35] C. Baohua, S. Yaow and D. Shijie. "Studies on a computational model and the stress weld characteristics of weld-bonded joints for a car body steel sheet". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 100, pp. 171-178. 2000.
- [36] B. Lichun. "Crack growth prediction and non-linear analysis for an elasto-plastic solid". *International Journal of Engineering Science*. Vol. 47, pp. 325-341. 2009.
- [37] J. Changheui, C. Pyung-Yeon, K. Minu, O. Seung-Jin and Y. Jun-Seog. "Effects of microstructure and residual stress on fatigue crack growth of stainless steel narrow gap welds". *Materials and Design*. Vol. 31, pp. 1862-1870. 2010.
- [38] M.A. Wahab and M.S. Alam. "The Effect of Torsional Interaction of a Circular Porosity and a Solidification Crack on Fatigue Crack Propagation Life of Butt Welded Joints". *Proceeding of 10th International Conference of Composite Engineering*, pp. 753-754. New Orleans. 2003.
- [39] K.J. Kirkhope, R. Bell, L. Caron, R.I. Basu and K.T. Ma. "Weld detail fatigue life improvement techniques Part 2". *Application to ship structures*. *Marine Structures*. Vol. 12, pp. 477- 496. 1999.
- [40] F.V. Lawrence, R.J. Mattos, D.W. Hoepfner, Y. Higashida and J.D. Burk. "Estimating the Fatigue Crack Initiation Life of Welds". *Fatigue Testing of Weldments*. ASTM STP 648. Ed. ASTM, pp. 134-158. 1978.
- [41] M. Ouisse and S. Cogan. "Robust design of spot Welds in automotive structures: A decision-making methodology". *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 24, pp. 1172-1190. 2010.
- [42] P. Segle, S.T Tu, J. Storesund and L.A. Samuelson. "Some issues in life assessment of longitudinal seam welds based on creep tests with cross-weld specimens". *Ht. J. Pres. Ves. & Piping*. Vol. 66, pp. 199-222. 1996.
- [43] X. Yong, Z. Qing, P.C. Wang, N.L. Johnson, X.Q. Gayden and J.D. Fickes. "Development of a high-efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures, PartII: Dynamic experiments and simulations". *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Vol. 29, pp. 427-433. 2009.
- [44] A.S. Balankin and J. Hidalgo. "Mecánica de la Fractura Probabilística aplicada al Programa de Inspección en Servicio Informada en el Riesgo". *Proyecto del CNSNS*. 2000-2001.
- [45] J. Guirao, E. Rodríguez, A. Bayón, F. Bouyer, J. Pistono and L. Jones. "Determination through the distortions analysis of the best welding sequence in longitudinal welds VATS electron beam welding FE simulation". *Fusion Engineering and Design*. Vol. 85, pp. 766-779. 2010.
- [46] T.H. Hyde, W. Sun, A.A. Becker and J.A. Williams. "Life prediction of repaired welds in a pressurised CrMoV pipe with incorporation of initial damage Original". *Research Article International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 81, Issue 1, pp. 1-12. 2004.

- [47] L. Slezcka. "Low cycle fatigue strength assessment of butt and fillet weld connections". *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 60, pp. 701-712. 2004.
- [48] P. Arora, P.K. Singh, V. Bhasin, K.K. Vaze, A.K. Ghosh, D.M. Pukazhendhi, P. Gandhi and G. Raghava. "Predictions for fatigue crack growth life of cracked pipes and pipe welds using RMS SIF approach and experimental validation". *Original Research Article International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 88, Issue 10, pp. 384-394. 2011.
- [49] V. Tvergaard and A. Needleman. "3D analyses of the effect of weld orientation in Charpy specimens". *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 71, pp. 2179-2195. 2004.
- [50] W. Rui-Jie, S. De-Guang. "Low-cycle fatigue life prediction of spot welds based on hardness distribution and finite element analysis". *International Journal of Fatigue*. Vol. 31, pp. 508-514. 2009.