ESTUDIO DEL ARTE DE SOLDADURAS SOMETIDAS A FATIGA POR MEDIO DEL TRATAMIENTO DE IMPACTO POR ULTRASONIDO

VICTORIA EUGENIA MONSALVE PALENCIA

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSGRADOS
ESPECIALIZACIÓN EN SOLDADURA
BOGOTÁ D.C
2012

ESTUDIO DEL ARTE DE SOLDADURAS SOMETIDAS A FATIGA POR MEDIO DEL TRATAMIENTO DE IMPACTO POR ULTRASONIDO

Monografía

VICTORIA EUGENIA MONSALVE PALENCIA

HECTOR FERNANDO ROJAS
Director

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSGRADOS
ESPECIALIZACIÓN EN SOLDADURA
BOGOTÁ D.C
2012

Nota de aceptación

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. Junio 07 de 2012

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN **i**

1. ANTECEDENTES **1**

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA **11**

3. JUSTIFICACIÓN **12**

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General **13**

4.2 Objetivos Específicos **13**

5. DELIMITACIÓN **14**

6. MARCO TEÓRICO

6.1 Tratamiento de Impacto por Ultrasonido (UIT) **15**

6.1.1 Beneficios del tratamiento de impacto por ultrasonido **16**

6.1.2 Aplicaciones **18**

6.2 Comportamiento a la fatiga de una unión soldada **19**

6.2.1 Discontinuidades debidas a la soldadura y al proceso de soldadura **19**

7. MARCO CONCEPTUAL **25**

8. RESULTADOS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA **28**

9. CONCLUSIONES **33**

10. BIBLIOGRAFÍA **34**

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Características de zonas tratadas **18**

Tabla 2. Propiedades esenciales **27**

Tabla 3. Composición Química **27**

Tabla 4. Temperatura **27**

Tabla 5. Resistencia a la fluencia **28**

Tabla 6. Zonas de temperatura para ensayo de impacto **28**

Tabla 7. Requisitos químicos **28**

Tabla 8. Características mecánicas mínimas **29**

Tabla 9. Normas Europeas EN Propiedades Mecánicas **29**

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Espécimen obtenido por medio de tratamiento de impacto por ultrasonido **1**

Figura 2. Especímenes **6**

Figura 3. Equipo UIT **16**

Figura 4. Método UIT **17**

Figura 5. Aspecto antes y después del método UIT **17**

Figura 6. Diagrama tensión – deformación **22**

Figura7. Variación de la dureza en unión soldada **23**

Figura 8. Porosidad alineada en el cordón de la raíz **24**

Figura 9. Inclusiones de escoria entre cordones **25**

Figura 10. Inclusiones de Wolframio **25**

Figura 11. Simulación ANSYS **33**

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo realizar una recopilación bibliográfica del método de tratamiento de impacto por ultrasonido. El estudio se enmarcó en la información de distintos autores que han manejado el tema con el fin de proveer información válida para este contenido. El método de tratamiento de impacto ultrasónico (UIT) consiste en relevar tensiones residuales en la soldadura. Cabe mencionar que esta técnica mejora la calidad de resistencia a la fatiga. Dichos análisis evidencian la mejora de la soldadura sometidas a fatiga por el método del tratamiento de impacto ultrasónico. Este método se puede realizar durante el proceso de soldadura, lo que favorece a prever la acumulación de esfuerzos que pueden generar las rupturas.

En los primeros capítulos se abordó algunos antecedentes y posteriormente el tema de poder entender el concepto y ver teóricamente el comportamiento a la fatiga en una unión soldada. Al finalizar este escrito se realizó una revisión bibliográfica obteniendo conclusiones acerca del método de impacto por ultrasonido.

1. ANTECEDENTES

A continuación se describen algunos de los estudios más representativos realizados en relación con la fatiga en los elementos y piezas soldadas, mediante el tratamiento de impacto por ultrasonido.

Ensayos de fatiga en uniones soldadas en acero de alta resistencia y aluminio mejorado mediante varios métodos, incluyendo tratamiento de impacto por ultrasonido (UIT)[1]

En este trabajo se resume el ensayo de fatiga en la soldadura, donde se toman muestras de acero de alta resistencia, las cuales presentan tratamiento de impacto por ultrasonidos, TIG vendaje y una combinación de preparación TIG y tratamiento de impacto por ultrasonidos.

Se realiza el diseño experimental en especímenes de aluminio en donde la primera placa cuenta con 6 mm de espesor y la cual se sometió a la condición de as-welded, hammer peened y needle peened. La placa de 8 mm con esfuerzos longitudinales se empleó con las mismas condiciones pero con tratamiento de impacto por ultrasonido.

Figura 1.

Espécimen obtenido por medio de tratamiento de impacto por ultrasonido

Fuente:[1] Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including ultrasonic impact treatment (UIT).

Una de las conclusiones observadas es que el tratamiento de impacto ultrasónico (UIT) aumenta considerablemente la resistencia a la fatiga, dando vida larga a la soldadura. El tratamiento combinado de TIG y luego el tratamiento de impacto por ultrasonido mejora la resistencia a la fatiga para el acero.

Física y el mecanismo de tratamiento de impacto por ultrasonido[2]

Este artículo muestra los aspectos técnicos del proceso, incluyendo teoría, prueba experimental y la forma de controlar los parámetros de impacto por ultrasonido. Describe por medio de la tecnología Esonic que el equipo de tratamiento de impacto por ultrasonido realiza la acción del impulso de la fuerza (generada por el transductor ultrasónico de vibraciones) en el extremo posterior de un penetrador aguja, moviéndose axialmente libre con una onda normalizada, con una longitud directamente en contacto con la punta del transductor y la superficie de impacto.

En esta fase de impacto, el penetrador vibra ultrasónicamente con un rebote de la superficie, sincronizado y con vibraciones ultrasónicas en su frecuencia de resonancia que es responsable de la frecuencia portadora en el espectro de impacto y la superficie de impacto. Se produce a vibrar adecuadamente a la frecuencia de la portadora, en la zona de impacto, sin rebote penetrador del transductor de iniciar punta y la superficie de impacto.

Así, el impacto de ultrasonidos, junto con la deformación plástica del material de la superficie y el estrés generan impulsos en el material, la cual está acompañada por deformación plástica ultrasónica del material de la superficie y la generación de ondas ultrasónicas de esfuerzo en la superficie del material.
Al mismo tiempo, el impacto causado por un solo impulso de la fuerza crea en

el área de plasticidad deformaciones en la superficie de impacto y proporciona impulsos para la propagación de la tensión en la superficie del material.

El método que propone para comparar la eficacia de impacto se basa en la comparación de los resultados de la deformación de la superficie de plasticidad con las condiciones de impacto individuales siendo la misma. Esto también incluye que el penetrador y la geometría, son responsables del contacto de la superficie del material de la carga dinámica equivalente.

Se concluyó que el impacto por ultrasonido cambia fundamentalmente la naturaleza de la interfaz y la interacción en el sistema oscilante por tipo de penetrador de aguja. La principal característica de la interacción se define por las fases del tiempo del UIT:

- Las vibraciones ultrasónicas de un penetrador en una brecha entre la punta del transductor y la superficie a tratar
- En la fase continua (sin desprendimiento) ultrasónico vibraciones de un penetrador en sincronismo con estas superficies

La duración del impacto ultrasónico es mayor que la del impacto solo por un orden de magnitud.

Las pruebas de grandes vigas tratadas para mejorar la resistencia a la fatiga [3]

Se realiza un estudio a dos vigas armadas, la cual presentan pequeñas grietas de fatiga. A once de dieciocho muestras de las vigas soldadas con detalle de soldadura se les realizó el tratamiento de impacto ultrasónico en el pie de soldadura con el objetivo de inducir tensiones residuales de compresión y

reducir la concentración de tensión en la soldadura, luego del ensayo se concluye que se mejora la resistencia a la fatiga.

El efecto del tratamiento de impacto ultrasónico sobre la resistencia de la fatiga por fricción en paneles soldados[4]

En este estudio experimental se evalúa el desarrollo del tratamiento de impacto ultrasónico en la resistencia a la fatiga por fricción de la soldadura en paneles de aleación de aluminio.

Al realizar el tratamiento de impacto por ultrasonido se observó un pequeño retraso del crecimiento de la grieta. Lo cual este efecto indica que disminuye la resistencia a la fatiga debido a la reducción y redistribución de las tensiones residuales con daños por fatiga.

Evaluación experimental y analítica de la mejora en la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas sometidas al tratamiento de impacto por ultrasonido[5]

Por tratamiento de impacto por ultrasonido se mejora el rendimiento en la fatiga lo cual fue evaluado en muestras fabricadas a gran escala de vigas de acero A588 Grado 345 W y A709 Grado HPS 690W. En el diseño experimental se realizan dieciocho ejemplares de haz laminados de haber soldado los detalles en la cubierta de placas y los refuerzos transversales y ocho muestras que sólo tienen los detalles de refuerzo transversales se pusieron a prueba bajo una carga de amplitud constante siguiendo UIT posterior a la soldadura.

Tres configuraciones de soldadura en el extremo terminal de la cubierta de la placa fueron investigadas. Los experimentos se realizaron a diversos tratamientos de esfuerzos mínimo y rango de tensiones. Los datos de prueba

sobre los detalles de refuerzo, se vieron limitadas por agrietamiento por fatiga de otros accesorios soldados en las muestras. Dentro de la gama de resultados de las pruebas disponibles, el tratamiento de impacto por ultrasonido mejora la resistencia a la fatiga de la soldadura, la microestructura y eliminó el crecimiento de grietas por fatiga.

Aumento de la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas por medio del tratamiento de impacto por ultrasonido[6]

La mejora del rendimiento de resistencia a la fatiga de las uniones soldadas por tratamiento de impacto ultrasónico está siendo evaluada en muestras de acero laminadas, los cuales presentan un rendimiento que tiene una resistencia de 50 a 60 ksi (345 a 415 MPa). W27x129 perfiles laminados en haz, que tengan placas de cubierta, con tres detalles finales diferentes de soldadura y refuerzos transversales, están siendo probados en carga de amplitud constante. Todos los detalles críticos de fatiga en la soldadura tendieron a mejorar por el tratamiento de impacto ultrasónico.

En el diseño experimental se llevo a cabo dieciocho ejemplares, los cuales fueron probados en seis grupos de tres cada uno. Las muestras de ensayo se investigan en el inicio y la propagación de la grieta. Por tal razón las muestras son inspeccionadas visualmente, con ayuda de una lupa ya que su objetivo es tener al menos una grieta de fatiga en cada uno de los especímenes.

La técnica del tratamiento de impacto por ultrasonido es una alternativa viable en el proceso de la soldadura, debido que demostró una mejora a la resistencia a la fatiga de todas las muestras realizadas.

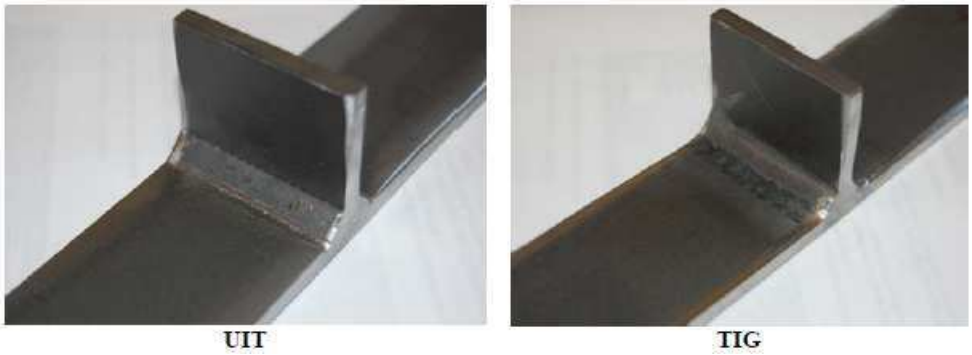
Comparación del tratamiento después de la soldadura de acero de alta resistencia en las soldaduras en fatiga de ciclo medio[7]

El trabajo demuestra una comparación de tres tratamientos que se realizan después de la soldadura para mejorar la fatiga de las juntas soldadas. Se hace con el fin de determinar el tratamiento más adecuado. Los procesos investigados son con fresa esmerilado, TIG y el tratamiento de impacto por ultrasonido.

El diseño experimental empleado se realizó en placas de acero grado S700 con uniones en T, las cuales se llevaron a fatiga en cuatro puntos de flexión y se aplicaron los diferentes tratamientos de post – soldadura.

Figura 2.

Especímenes



Fuente:[1] Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including ultrasonic impact treatment (UIT).

Una de las conclusiones obtenidas es que a partir de los tres métodos investigados los niveles de resistencia a la fatiga fueron de 31% de las rebabas de molienda, 33% de tratamiento de impacto ultrasónico y 38% de las TIG. El proceso de tratamiento de impacto ultrasónico mostró un nivel elevado de una mejora en la resistencia a la fatiga, incluso bajo los rangos de tensión hasta el límite elástico del material base.

La influencia del tratamiento de impacto por ultrasonido sobre el comportamiento a la fatiga de las uniones soldadas en aceros de alta resistencia[8]

Este documento presenta el ensayo de fatiga, empleando muestras aceros de alta resistencia, en donde se realizaron en dos grados, designada formalmente USIFORM 355 y 700 USIFORM. Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo en T-conjuntos muestras hechas a partir de 6 mm para hojas USIFORM 355 y las hojas de 5 mm USIFORM 700.

Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo sobre muestras de chorro de arena con las soldaduras mismas. Este proceso a veces se utiliza para la eliminación de la capa de óxido. Puesto que la forma de la soldadura de acero S355 no está optimizado, el láser de re-fusión del borde de la soldadura fue también probado. El método de tratamiento de impacto por ultrasonido disminuye el factor de concentración de tensiones y puede disminuir las tensiones residuales locales. Desafortunadamente, debido a la estrecha zona tratada local tensiones residuales no han sido medidos. De los resultados de pruebas de fatiga, se puede ver que la técnica UIT aumenta la resistencia a la fatiga en el régimen de alto ciclo, así como para la vida de límite (100 000 ciclos). Además, la dispersión es invariable cuando se aplica esta técnica.

Se demostró que para el acero 700 USIFORM el límite de resistencia aumento más del 120%. Sin importar la forma de la soldadura, el método UIT es favorable porque cambia la geometría local y puede ser utilizado sobre soldaduras que presenten grietas iniciales. Por lo tanto, la técnica de UIT ofrece grandes posibilidades para utilizar aceros de alta resistencia en la fabricación de estructuras soldadas.

Estimación de la mejora de la vida de la fatiga por medio del tratamiento de impacto por ultrasonido en las uniones soldadas[9]

Se observa en este estudio que las complejas estructuras fabricadas sujetas a cargas de fatiga, presentan fallas en las uniones soldadas y que estos problemas pueden ser corregidos por el diseño de detalle, pero para un mejor comportamiento a la fatiga también pueden ser mejorados por medio de métodos luego de la soldadura. El tratamiento de impacto ultrasónico (UIT) es un método de mejora.

El estudio presenta los datos experimentales de resistencia a la fatiga que llevan en la condición de soldado y UIT tratada. Se realizan muestras que fueron fabricadas de acero estructural S355 J0 con placa de 8mm de espesor, donde tienen una región relativamente pequeña de alta concentración de tensiones.

Las soldaduras tratadas mostraron que tienen una fuerza aproximadamente 50% mayor de fatiga. Esta mejora en la fuerza se ha modelado utilizando el enfoque de la tensión local. Los parámetros de los materiales en la zona altamente trabajados en frío y tratados por el método UIT se han obtenido utilizando la Ley de Material Uniforme para el análisis de la fatiga. La concentración de esfuerzos se calculó utilizando el análisis de FE y la media de estimaciones de esfuerzos se basa en medidas de difracción de rayos-X del estado de tensiones residuales en la zona tratada. El grado de mejora fue calificado como excelente de acuerdo con la mejora obtenida experimentalmente.

Tratamiento de impacto por ultrasonidos para endurecer la superficie el material de acero-motor in718[10]

Este trabajo se realiza con el fin de satisfacer los estrictos requisitos en relación con la fiabilidad, el peso mínimo, de alta rendimiento, costo-efectividad y la durabilidad a largo plazo, los componentes de los motores de los aviones se debe aprovechar todo el potencial de los materiales utilizados. Por tal razón, ha incrementado el interés en los procesos de endurecimiento para el desarrollo de nuevos métodos.

Un nuevo método es el tratamiento de impacto por ultrasonido, es utilizado en el manual de post-soldadura para el tratamiento de los aceros. Este método baja cargas, es rentable y fácil de controlar de tal manera que puede ser adecuado para una amplia gama de aplicaciones. En el diseño experimental se aplica tratamiento de impacto ultrasónico a la alta resistencia de la aleación de base níquel IN718. Para caracterizar la capa superficial endurecida, las mediciones de rugosidad de la superficie y Rayos X se realizan análisis de tensiones residuales y se tomaron incluidos los experimentos para evaluar la estabilidad térmica de las muestras seleccionadas. Los resultados obtenidos se compararon con vacuna martillado y laminado en superficies profundas. Se descubrió que la técnica UIT produce capa superficial profunda dureza del trabajo. La profundidad de endurecimiento y asperezas de la superficie son similares a la obtenida por laminación en profundidad. Así que, todas las ventajas específicas del tratamiento de impacto ultrasónico se pueden extender al endurecimiento superficial de los componentes del motor aerodinámico.

Efecto del tratamiento de impacto por ultrasonido sobre la corrosión bajo tensión de juntas soldadas de acero inoxidable 304 [11]

Un esfuerzo de alta tracción de la soldadura residual es un factor importante que contribuye a corrosión bajo tensión (Stress Corrosion Cracking SCC). El tratamiento de impacto ultrasónico puede producir tensiones de compresión en la superficie de las uniones soldadas que dificultan la tracción para mejorar la resistencia de las uniones soldadas SCC. En el presente trabajo, el método de difracción por rayos X se utilizó para obtener la distribución de la tensión residual inducida por UIT. Los resultados mostraron que podría causar un gran esfuerzo de compresión residual de 300 MPa en la superficie del material. Un modelo 3D de elementos finitos se estableció para simular el tratamiento de impacto ultrasónico mediante el uso de los elementos finitos ABAQUS de software.

La distribución de la tensión residual del acero inoxidable AISI 304 inducida por la UIT fue predicha por el análisis de elementos finitos. Con el fin de demostrar la mejora de la resistencia de las uniones soldadas, las muestras se sumergieron en solución de ebullición 42% de cloruro de magnesio durante la prueba de SCC, y la muestra no fue tratada después de la inmersión durante 23 h. En contraste, las muestras tratadas con una duración diferente de impacto fueron analizadas para 1000 h sin fisuras por tensión de corrosión visibles. Los resultados obtenidos bajo la observación de la microestructura revelaron que una capa endurecida se formó sobre la superficie y la primera estructura de grano grueso en la superficie se refinó en granos extrafinos. Los resultados anteriores indican que el tratamiento de impacto ultrasónico es un enfoque efectivo para la protección de soldaduras contra SCC.

Los métodos de ultrasonido de impacto para el tratamiento de estructuras soldadas[12]

Esta invención proporciona métodos de tratamiento para los productos de trabajo de materiales tales como acero, bronce, plástico, etc. y en particular los cuerpos de acero soldados por la energía del impulso de impacto, preferiblemente ultrasónico, para disminuir la fatiga, el envejecimiento y prolongar la vida útil. El tratamiento se puede producir: (a) en la producción original, (b) durante el período de vida activa para el mantenimiento o (c) después de un fallo en una etapa de reparación. El tratamiento con ultrasonidos mejora la resistencia del producto de trabajo. En tubos con costura patrones de tensiones residuales de soldadura cerca de los sitios son los defectos relajados y micro del estrés, como los huecos y los límites habituales de granos se redujo.

Los pasos básicos son el método no destructivo en la naturaleza, la inducción de ondas de compresión de impulsos interiores con transductores ultrasónicos y herramientas accesorias afectan a una superficie de un producto externo con impulsos de energía suficiente para calentar y temporalmente plastificar el interior de metal y liberar tensiones. La naturaleza de la estructura de trabajo interior producto que está siendo tratada se determina mediante la detección del movimiento mecánico en la superficie de impacto del cuerpo de trabajo para producir señales de retroalimentación de frecuencia y fase de respuesta a las señales de impacto de entrada.

Estas señales se ajustan automáticamente a la conducción frecuente de impulsos de energía y la fase a los transductores de entrada, para que coincida con la frecuencia de resonancia mecánica de los transductores de trabajo y aumentar la eficiencia de la transferencia de energía. Tales señales de retroalimentación también están disponibles para los procedimientos automatizados que pueden mejorar la calidad y consistencia del producto.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se puede determinar que en la industria uno de los principales defectos que se presenta en la unión de los elementos o piezas soldadas, es el factor de fatiga el cual afecta significativamente el procedimiento de soldadura. Este estudio tiene como fin analizar el comportamiento de fatiga por medio de tratamiento de impacto por ultrasonido y analizar la metodología del proceso.

En Colombia, actualmente, para eliminar las tensiones residuales se sigue el procedimiento de calentar toda la estructura por encima de una cierta temperatura, dependiendo del material se tiene un valor, y a continuación dejarla enfriar. Mejorando la resistencia contra la ruptura frágil en soldaduras.

3. JUSTIFICACIÓN

Se busca dar conocer conceptos teóricos e investigaciones que permitan determinar puntos claves en los procesos de soldadura en los que intervienen las variables que influyen en la resistencia a la fatiga de las juntas soldadas y que se puedan reducir con la técnica del tratamiento de impacto por ultrasonido.

En la actualidad se encuentra bibliografía sobre el proceso, por lo que en este estudio se mostrarán publicaciones e investigaciones recientes, en las que aparezcan variantes y factores representativos que intervienen en la realización de dicho proceso y enfocarse a las condiciones requeridas.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Realizar un estudio de arte en el comportamiento de la soldadura que son sometidas a fatiga por medio del Tratamiento de Impacto por Ultrasonido (UIT).

4.2 Objetivos Específicos

- Identificar las características del UIT a través de los diferentes estudios realizados
- Investigar las metodologías utilizadas en el UIT y sus resultados
- Revisar y analizar la recopilación bibliográfica del método de tratamiento de impacto ultrasónico.
- Inferir sobre la técnica UIT es viable a la industria colombiana.

5 DELIMITACIÓN

El proyecto es totalmente teórico y se analizará la investigación del tratamiento de impacto por ultrasonido exclusivamente en uniones soldadas. Este estudio se basará en investigaciones bibliográficas, por lo que no se realizarán pruebas físicas.

6 MARCO TEÓRICO

6.1 TRATAMIENTO DE IMPACTO POR ULTRASONIDO

El Tratamiento de Impacto Ultrasónico (UIT) es un método relativamente nuevo, originalmente desarrollado en la antigua Unión Soviética para el uso de la construcción naval y la construcción de submarinos. Cuando se aplica correctamente, el método es capaz de proporcionar un metal de soldadura más gradual a base de metal de transición ayudando a reducir la concentración de tensión local.

El método implica una deformación del borde de la soldadura por martilleo mecánico a una frecuencia de alrededor de 200Hz superpuesto por tratamiento ultrasónico a una frecuencia de 27 kHz. El objetivo del tratamiento es introducir compresión residual y tensiones en el borde de la soldadura, por medio de un recorrido suave para disminuir la centralización de estrés por exceso del metal de soldadura, la dispersión de los defectos de la superficie del borde de la soldadura. Se crea tensión por deformación plástica de la superficie y reduce la concentración de tensiones por alisamiento del perfil al borde de la soldadura.

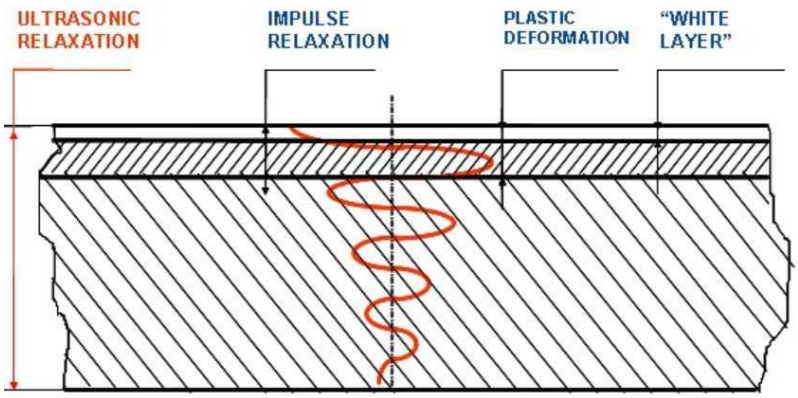
Figura 3

Equipo UIT

Fuente: Structural Integrity Technologies Inc. (Sintec)

Figura 4

Método UIT



Fuente: Applied ultrasonics

Figura 5

Aspecto antes y después del método UIT

Fuente:[9] Estimation of fatigue life improvement for ultrasonic impact treated welded joints

6.1.1 Beneficios del tratamiento de impacto por ultrasonido

Un martillo convencional y la aguja peening son métodos de alta frecuencia, con bajas vibraciones y la evolución del ruido, conduce a un control de calidad alta. En comparación del método UIT la operación es más cómoda, eficaz y de uso simple: se puede aplicar en minutos, ofrece una gran accesibilidad incluyendo por ejemplo sobrecarga de la aplicación y que no requiere ningún tráfico puente para ser desviado o alterado. Estos dispositivos, ofrecen gran utilidad potencial, especialmente como una medida de adaptación para mejorar el tiempo de vida útil de las actuales estructuras.

El método UIT tiene características de los efectos realizados sobre las zonas o áreas que es tratada por la tecnología.

Tabla 1

Características método UIT

Zona	*Características*
"Blanco Capa" 0,02 a 0,5 mm	Aumento de la resistencia a la abrasión, la corrosión y la lubricación de superficie
Deformación Plástica 1,0 a 2,5 mm	Aumento de la resistencia a la fatiga, la compensación por la deformación de la soldadura, disminución de la fatiga por corrosión
Impulso de relajación 3,0 a 5,0 mm	Disminución de las tensiones residuales y la tensión de hasta el 70% del estado inicial
Relajación por ultrasonidos 10 a 15 mm	Disminución de las tensiones residuales y la tensión de hasta 50% del estado inicial

Fuente: Applied ultrasonics

La siguiente lista describe los efectos beneficiosos que pueden resultar debido al tratamiento. La acción controlada de la aplicación permite definir la combinación de los efectos mencionados a continuación mediante la alteración de la configuración de los parámetros de control y tratamiento.

- Formación de una capa blanca de hasta 10 micrómetros de profundidad con una excepcional resistencia a la corrosión, resistencia a la abrasión y lubricidad.
- Deformación plástica de la superficie.
- Eliminación de esfuerzo de tracción y la introducción de compresión favorable subrayar hasta 12 milímetros de profundidad.
- Alteración del acabado superficial que resulta en una superficie más lisa y eliminando defectos.
- Mejora en la resistencia a la corrosión y resistencia a la fatiga, hasta 250% y 400% respectivamente. Estos cambios en las características del material suministra mejoras sustanciales tanto en la utilización como en la fabricación de estructuras metálicas. Estos incluyen:

a) Mejora la vida útil en aplicaciones sometidas a cargas dinámicas o ambientes agresivos.
b) Reduce el costo de mantenimiento en las estructuras metálicas sujetas a la fatiga por corrosión.
c) Disminución de costo de fabricación y funcionamiento a través del uso de menos material.
d) Mejora del uso de aleaciones de alta resistencia de acero que antes estaban limitados por las propiedades de soldadura.
e) Mejora la estabilidad estructural durante la fabricación y funcionamiento.
f) Reducción de costos de mantenimiento

6.1.2 Aplicaciones

El tratamiento de impacto por ultrasonido es altamente controlable. La incorporación de un controlador lógico programable (PLC), la frecuencia y la amplitud de la UIT son fáciles de configurar y mantener, eliminando así una parte importante de la dependencia del operador. El equipo de tratamiento de impacto ultrasónico también puede ser controlado mecánicamente, proporcionando así la repetitividad de los resultados de una aplicación a otra. Ejemplos de control mecánico empleado con UIT incluyen:

- Las máquinas de fresado
- CNC
- Los tornos
- Control de Robótica
- Soldadura tractores

Con estos tipos de aplicaciones controladas, el acabado superficial de la pieza de trabajo es muy controlable.

Para muchas aplicaciones el UIT se emplea con mayor eficacia con la mano. La alta portabilidad del sistema UIT permite viajar a lugares austeros y lugares

de difícil acceso. La flexibilidad que se ve facilitado por las variaciones en la configuración de la herramienta asegura que el acceso a los lugares muy estrechos es posible.

La eficacia TIO se ha ilustrado en los siguientes metales, entre otros:

- Aluminio
- Bronce
- Las aleaciones de cobalto
- Las aleaciones de níquel
- Los aceros de acero al carbono
- Acero inoxidable de alta resistencia y baja aleación de acero
- Acero Manganeso
- Titanio

6.2 COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UNA UNIÓN SOLDADA

El fallo por fatiga se empieza por la formación de una pequeña grieta que se va propagando. El origen se puede dar por varias causas en donde se puede encontrar una cantidad de factores que contribuyen a que sucedan, siendo este comportamiento uno de los más importantes por la concentración de tensiones originada por los cambios bruscos de la geometría.

En todos los nudos de las estructuras existen puntos de concentración de tensiones, siendo estos puntos los más indicados para que se ocasione el fallo por fatiga. Si el nudo es soldado además de la concentración de tensiones propias de la macro geometría de la estructura, se producirán otras debido a que en el proceso de soldadura interviene una variación de las propiedades físicas del material, de su composición y de su estructura cristalográfica, así como concentraciones de tensión debidas a las inevitables inclusiones y porosidades que se producen en el proceso de soldeo.

Además, la cantidad de calor puntual produce una distribución uniforme de temperaturas en la zona soldada, la cual generará tensiones residuales del orden del límite elástico que influirán en la tensión real de fatiga en los distintos puntos afectados por el calor.

6.2.1 Discontinuidades debidas a la soldadura y al proceso de soldadura

Aparte de las concentraciones de tensión debidas a la geometría del perfil de la soldadura, tener en cuenta otros factores que afectan una unión soldada por fatiga.

6.2.1.1 Variación de las propiedades físicas

El material de aporte se elige de forma que sus propiedades sean mejores que las del metal base, de esta forma se pretende que la soldadura no sea el elemento limitativo de la carga que soporta la estructura. Donde se presenten uniones a tope con carga estática donde la geometría no posea ningún concentrador de tensiones en la soldadura la tensión soportada por la soldadura será mayor que la tensión de fallo del metal base.

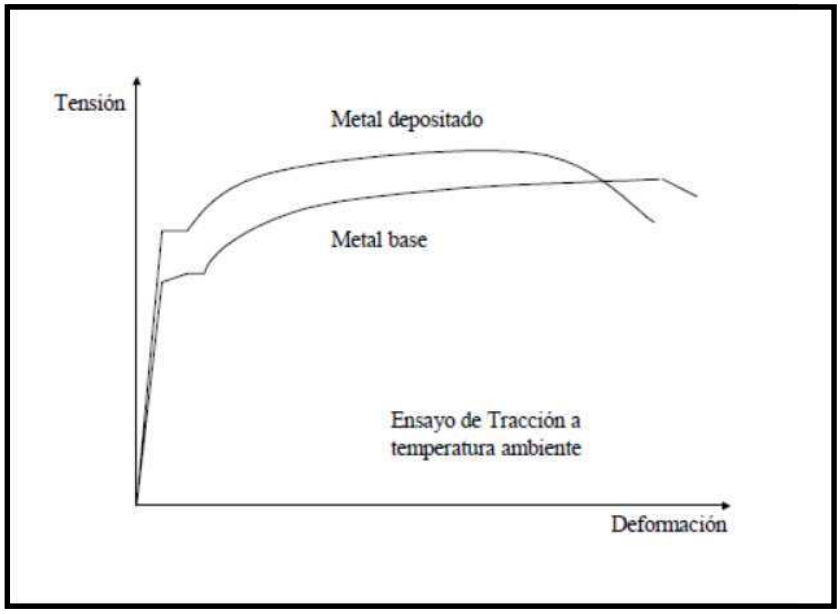


Figura 6 Diagrama tensión - deformación

6.2.1.2 Variación de la composición del metal

Al realizar la soldadura se produce una modificación de la composición química en la zona fundida, por reacción químico física y por dilución de los metales de aporte, metal base, gases, fundentes y posibles impurezas superficiales. Como consecuencia de la rapidez del proceso, no se alcanzan a realizar

composiciones homogéneas en el metal fundido, esto origina problemas y se manifiesta en algunas soldaduras originando fisuras o fenómenos de corrosión.

6.2.1.3 Variación de la estructura cristalográfica

Al realizar el proceso de soldadura en los aceros deformados en frío se produce la recristalización del metal base por la gran cantidad de calor que se transmite. Esta recristalización produce la reorganización de la estructura cristalina del metal y también un crecimiento de grano que produce un ablandamiento de la aleación.

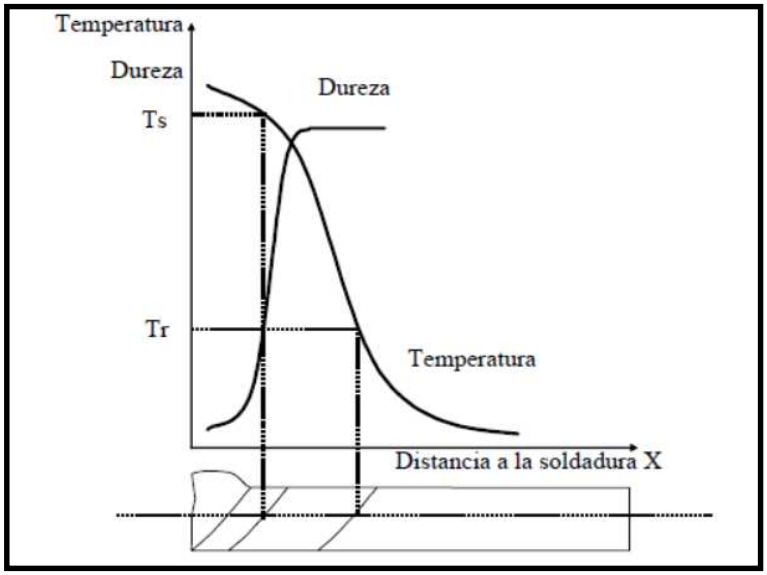


Figura 7. Variación de la dureza en unión soldada

En la figura se muestra la variación de la dureza en una unión soldada de un metal deformado en frío en función de la temperatura máxima alcanzada en el calentamiento.

6.2.2 Inclusiones y porosidades

Las porosidades son causadas por los gases que se disuelven en el baño de fusión de la soldadura; cuando el metal fundido reduce la temperatura la solubilidad del gas disminuye, produciendo burbujas que pueden ser atrapadas en la solidificación dando lugar a poros. Esta discontinuidad depende de la velocidad de enfriamiento y de la velocidad a la cual las burbujas formadas sobresalgan hacia la superficie del baño fundido.

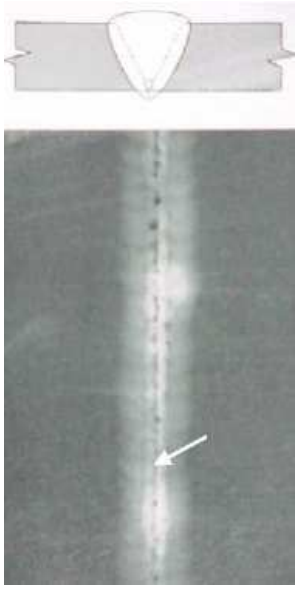


Figura 8. Porosidad alineada en el cordón de la raíz

La inclusión es un material sólido y extraño, que es atrapado; la mayoría de los casos se presenta por escoria, fundente, tungsteno u óxido. Las inclusiones de escoria son regiones dentro o sobre la superficie de la soldadura, que es atrapado adentro del metal solidificado. Solo ocurren cuando el proceso de soldadura usa alguna clase de fundente de protección.

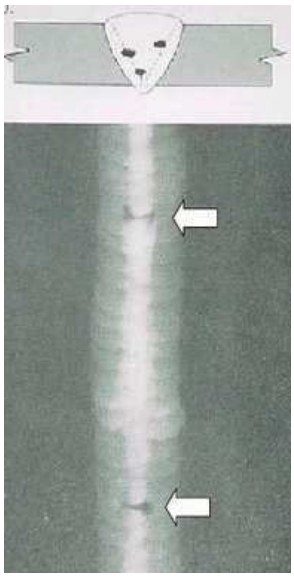


Figura 9
Inclusiones de escoria entre cordones

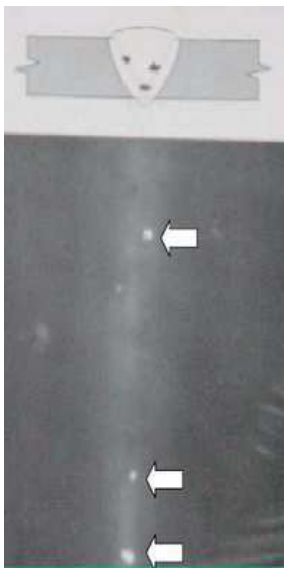


Figura 10
Inclusiones de Wolframio

Las inclusiones de tungsteno se asocian al proceso STAW, en donde se emplea un electrodo de tungsteno, una de las causas es cuando el electrodo hace contacto con el charco el arco puede extinguirse y el metal fundido puede solidificar alrededor de la punta del electrodo, hasta que este sea removido y se incluirá en la soldadura.

6.2.3 Tensiones residuales

El origen a la resistencia a la tensión residual se origina al aporte térmico y el posterior enfriamiento. Esto produce dilataciones y contracciones en el metal base y en el de aportación que provoca un estado de tensiones cuya magnitud en las proximidades del cordón soldado puede ser del orden del límite elástico del material.

Al aplicar la soldadura en su estado más caliente y dilatable al material base, el cual es más templado, la soldadura se enfría apresuradamente e intenta encogerse por el enfriamiento. Por ser incorporado al metal base no puede

encogerse, lo cual resulta estirarse del material base. En donde se produce mas factibilidad de fallo es en la zona afectada por el calor.

7 MARCO CONCEPTUAL

Acero grado S700: Es de la familia de los aceros rápidos, este grado de acero se utiliza en cuchillas de tornear y fresas para trabajos de alisado y desbastado, herramientas para trabajar en madera, herramientas para trabajar en frío sometidas a esfuerzos elevados y piezas torneadas.

Tabla 2

Propiedades esenciales

Nuance / Marca BÖHLER	Dureté à chaud Dureza en caliente	Résistance à l'usure Resistencia al desgaste	Ténacité Tenacidad	Aptitude au meulage Aptitud para rectificado	Résistance à la compression Resistencia a la compresión
S700					

Fuente: Böhler

Tabla 3

Composición Química

Nuance / Marca BÖHLER	Composition chimique (valeurs indicatives en %) Composición química (valores de orientación en %)					
	C	Cr	Mo	V	W	Co
S700	1,26	4,0	3,6	3,2	9,3	10,0

Fuente: Böhler

Tabla 4

Temperatura

Nuance / Marca BÖHLER	Température de recuit Temperatura de recocido blando	Température de recuit de détente Temperatura de distensionamiento	Température de trempe[3)] Temperatura de temple[3)]
S700	770 - 840°C (1418 - 1544°F)	600 - 650°C (1112 - 1202°F)	1200 - 1240°C [4)] (2192 - 2264°F) [4)]

Fuente: Böhler

3) Margen de temperatura superior para herramientas de forma simple, margen de temperatura inferior para herramientas de forma complicada.

Acero A588 Grado 345 W: *(Norma Técnica Colombiana NTC4005)* Acero al carbono de alta resistencia y baja aleación, usado en perfiles, placas y barras estructurales; acero de aleación templado y revenido para placas previstas para usos en los puentes. El grado se encuentra con un nivel de resistencia a la fluencia de:

Tabla 5

Resistencia a la fluencia

Grado [S.I]U.S	*Resistencia a la Fluencia, [MPa] Ksi*
345W [50W]	*345 [50]*

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC4005

Este acero se debe fabricar mediante una práctica para obtener grano fino mediante acero reposado, es decir, ha sido desoxidado por completo previamente a la colada.

Tabla 6

Zonas de temperatura para ensayo de impacto

Zona	Temperatura minima de servicio, °C [°F]
1	0 [-18]
2	por debajo de -18 hasta - 34 [0 hasta -30]
3	por debajo de -34 hasta -51 [-30 hasta -60]

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC4005

Tabla 7

Requisitos químicos

					Silicio[C]	
Diámetro máximo, espesor o distancia entre caras papalelas, mm [pulgada]	Carbono máx, %	Manganeso[B] máx, %	Fósforo máx, %	Azufre máx, %	Placas hasta de 40 mm [1 1/2 pulgadas] de espesor, perfiles hasta 634 kg/m 426 lb/pie [426 lb/pie], barras en Z y uniones en T laminadas, máx, %, [D]	Placas de más de 40 mm [1 1/2 pulgadas] de espesor y perfiles de más de 634 kg/m [426 lb/pie], %
4 [100]	0,23	1,35[E]	0,04	0,05	0,40	0,15-0,40

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC4005

Acero estructural S355 J0: El material mencionado es para dimensionamiento limitado por su nivel tensional y posee una alta soldabilidad.

Tabla 8

Características mecánicas mínimas

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico f_y (N/mm^2)			Tensión de rotura f_u (N/mm^2)	
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$3 \leq t \leq 100$	
S355J0	355	345	335	470	0

Fuente: CTE DB SE-A, 2006

Tabla 9.

Normas Europeas EN

Propiedades Mecánicas

DESIGNACION		Límite Elástico Superior (S/espesor)					Resistencia (Rm n/mm2)	Alargamiento (L=5d)			Energía (Kv Min J) Espesor > 10/100		
S 355 JO	1.0553	355	345	335	325	315	490/630	20	19	18	0	27	19

Fuente: Sabimet SA

8 RESULTADOS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El presente trabajo fue expuesto en torno a los temas vistos, indicando que el efecto de fatiga que se presenta en las uniones soldadas es la causa de aproximadamente el 90% de las fallas por rotura y a las fracturas rápidas. Esta discontinuidad actúa como concentrador de tensiones, que puede iniciar una fisura que lentamente bajo cargas cíclicas alcanza un tamaño crítico y de manera rápida crece produciendo una ruptura de la estructura.

En Colombia estos efectos se manejan por medio del tratamiento térmico, mientras que a nivel mundial se desarrolla una nueva tecnología llamada tratamiento de impacto ultrasónico, la cual ayuda al alivio de tensiones después del proceso de soldadura. Este estudio pretende ofrecer una breve descripción del método y las ventajas que ofrece a las uniones soldadas.

Se tomó como principal fuente al científico e ingeniero STATNIKOV [13], quien inventó y patentó en la década de 1970 la aplicación de ondas internas de compresión por medios de ultrasonidos a la estructura soldada para inducir en el interior de la soldadura un estado de plasticidad creando así una zona de tratamiento dinámico en el cordón de soldadura, produciendo una soldadura con mayor resistencia a la fatiga y una mayor capacidad de soporte de carga.

Al aplicarse el pulso de energía se crean ondas de compresión dentro del cuerpo plástico creando un patrón de gradientes de tensiones cónicas entre una unión soldada y un sitio de metal base en el cuerpo del producto. Esto reduce las concentraciones de esfuerzos que conducen a la fatiga, corrosión bajo tensión y fallo desastroso.

STATNIKOV presenta un nuevo método de reparación sin los costos de las operaciones técnicas aplicadas frecuentemente, como la remoción y la configuración de las superficies o procedimientos de protección como los tratamientos térmicos.

La invención se caracteriza por crear un alivio de concentraciones de esfuerzos que se forman durante el proceso de soldadura, creando productos soldados con una vida más larga y más alta capacidad de carga, a partir de esta investigación se iniciaron estudios más específicos usando este método.
A continuación se presenta una línea cronológica de la publicación de artículos y documentos que iniciaron a partir de 1977 investigadores en el tema, teniendo como referencia a Statnikov.

En 1998, Statnivok acompañado de Haagensen y Lopez-Martinez realizó un artículo titulado “Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including ultrasonic impact treatment (UIT”, el cual surge de la necesidad de dar soluciones óptimas de ingeniería en estructuras metálicas para la capacidad de cargas y reducir el consumo de metal, por este motivo de utilizan aceros de alta resistencia.

Este documento presenta los resultados de la investigación en técnicas después de soldadura para la mejora de la fatiga en las uniones soldadas. Se demostró que el método de tratamiento de impacto ultrasónico es la técnica más eficiente en estructura soldadas que operan bajo cargas variables en los aceros de alta resistencia.

Con el fin de aumentar las propiedades de fatiga de componentes soldados, este estudio utiliza una nueva técnica llamada tratamiento de impacto por ultrasonido (UIT) el cual fue probado en dos grados de aceros, USIFORM 355 en hojas de 6mm y hojas de 5mm para USIFORM 700 que se llevaron a cabo en T.

Se concluyó que la técnica de UIT para aceros de alta resistencia es beneficiosa en la soldadura, independientemente de la forma, ya que cambia la geometría local. Debido a los altos niveles de tensiones residuales este se puede aplicar sobre soldaduras que presenten grietas iniciales.

En el 2001, Sougata Roy, John W. Fisher y Ben T. Yen elaboraron un estudio titulado “*Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact*

Treatment (UIT)". Por medio de ensayos quisieron demostrar una mejora de la resistencia a la fatiga a partir del tratamiento de impacto por ultrasonido, para lo cual propusieron realizar un diseño experimental de soldadura que fuera sometido a este método.

Los resultados obtenidos en las muestras indican que la técnica de tratamiento de impacto por ultrasonido es viable para mejorar la resistencia a la fatiga.

Glatier, A., and Statnikov, en el año 2003 elaboraron un documental, el cual resume el ensayo de fatiga para aceros de alta resistencia en muestras con condición de soldado. Demostraron que el tratamiento de impacto por ultrasonido es la técnica más eficiente para la fabricación de estructuras soldadas en aceros de alta resistencia ayudando a operar bajo carga variables.

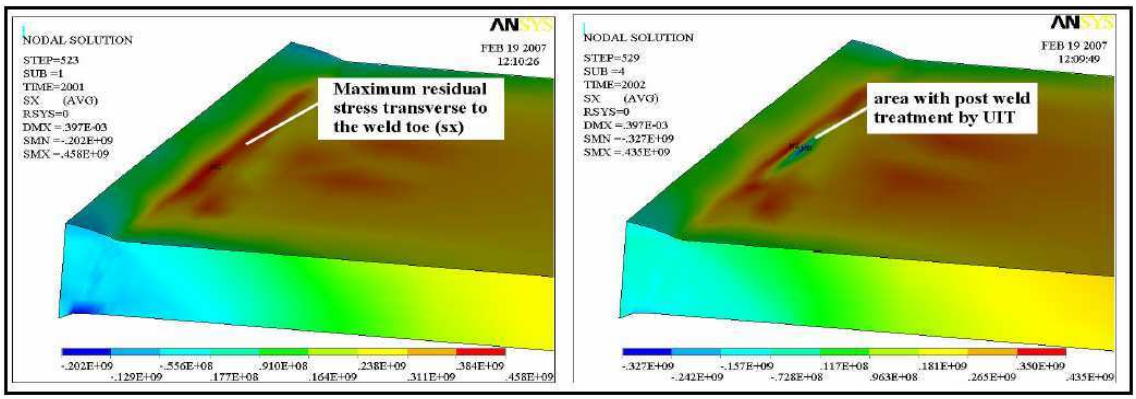
En el 2004 se encuentran dos documentos "*Physics and mechanism of ultrasonic impact treatment***"** y "*Estimation of fatigue life improvement for ultrasonic impact treated welded joints"*. El primero presenta los aspectos técnicos del proceso, donde se incluye teoría, prueba experimental y la forma de controlar los parámetros de impacto por ultrasonidos. Describe igualmente el mecanismo del defecto sobre los materiales, modo de retroalimentación, las herramientas y fuentes de alimentación con base a los resultados de las investigaciones realizadas en el tratamiento de impacto ultrasónico.

En el segundo estudio se observa que las estructuras fabricadas sujetas a cargas, fallan por fatiga en las uniones soldadas, lo cual se pueden corregir por detalles de diseño pero también por medio de métodos después de la soldadura. El tratamiento de impacto por ultrasonido es una técnica eficaz posterior a la soldadura, en el diseño experimental se realizaron muestras de acero estructural S355 J0 con 8mm de espesor, la cual presenta una región de alta concentración de tensiones. La conclusión observada es que las uniones soldadas presentaron una mejor resistencia a la fatiga

Uno de los estudios no incluidos en los antecedentes de este documento da a conocer por medio de una simulación, la forma como se comportan las soldaduras con y sin tratamiento de impacto por ultrasonido:

Figura 11

Simulación ANSYS



cita web | http://130.75.201.12/fileadmin/ftp-server/Publizierungen/DFE2008_PS_CK_engl.pdf |Conference Proceeding of the International Conference on Welded Structures |fecha=24-26 April 2008 |idioma=inglés

En resumen, la simulación muestra el comportamiento de la soldadura luego de aplicar el método de tratamiento de impacto por ultrasonido, indicando que tiene gran influencia en la resistencia a la fatiga, reduciendo la tensión residual en el material.

Uno de los más significativos avances en la industria de la soldadura es la aplicación del método tratamiento de impacto por ultrasonido, el cual no solo ha permitido ahorro en costos, sino de tiempos muertos a la hora de realizar una valorización del proceso. Tal como lo muestra el siguiente artículo:

“ CF Industries Dragline Life Extended 4x (and counting- still no cracking), saving at least $1.5 Million in repair/downtime costs

En septiembre de 2009, ultrasonidos aplicados tratados conexiones de soldadura en el bastidor e impulsar la estructura de una página de 852 draga propiedad de CF Industries, con su sistema patentado de UIT (Tecnología de impacto por ultrasonidos).

En el pasado, estas soldaduras se rompían cada 2-3 meses y no cada 6 meses, lo que requiere tiempo de inactividad asociado a la reparación y, año tras año, durante los 15 años de servicio del activo. El tratamiento ultrasónico de impacto se realizó durante un corte de reparación con una tripulación durante un período de 3 días. El UIT fue equipo de apoyo a varios equipos de soldadura haciendo reparaciones, sin embargo, debido a la velocidad y la eficiencia de la UIT, sólo añade unas pocas horas para el tiempo de reparación total.

Dado que el tratamiento de UIT, CF Industries no ha tenido ningún problema con el agrietamiento y no ha tenido que tomar la línea de arrastre fuera de servicio por reparaciones de soldadura, UIT extendió el tiempo medio entre fallos por **lo menos en cuatro ocasiones** y ha salvado a CF Industries **por lo menos $ 1,5 millones** en la reparación y el tiempo no productivo (el tiempo de inactividad) los costos." Cita Web: http://www.appliedultrasonics.com

De acuerdo a la teoría del presente estudio del arte en lo referido al método de tratamiento de impacto por ultrasonido, permite concluir que tiene un efecto positivo sobre la soldadura, pues se ha demostrado la contribución a la reducción de tensiones residuales de tracción. Este tratamiento como se mencionó anteriormente, ayuda a reducir costos y tiempos de mantenimiento alargando la vida útil de la soldadura.

9 CONCLUSIONES

Mediante este trabajo de investigación se reviso y analizo las características y métodos del tratamiento de impacto por ultrasonido, por medio de artículos e investigaciones. Se puede concluir lo siguiente:

- Al utilizar el método en el borde de la soldadura cambia el perfil de tensión y discontinuidad geométrica. El método introduce energía dentro de la pieza a estabilizar. Para la red de átomos con tensiones, no existe diferencia entre la energía térmica y la introducida por vibración. Esta energía vuelve a alinear la estructura interna del material aliviando los esfuerzos y estabilizando la pieza sin sufrir deformaciones.

- Actualmente en Colombia el tratamiento térmico es la única técnica realmente efectiva y reconocida por los códigos. Los otros métodos son alternativos y de uso particular, por lo que la industria normalmente no los utiliza cuando existe contractualidad.

- Las características del UIT mas relevantes encontradas es la mejora de la resistencia a la fatiga, mayor resistencia a la corrosión, la reducción de tensiones residuales, eliminación de la deformación de soldadura, entre otras, dando así un aumento de vida útil de servicio.

10 BIBLIOGRAFIA

[1] E. Statnikov et al., ***Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including ultrasonic impact treatment (UIT).*** IIW Doc XIII-1748-98

[2] ***Physics and mechanism of ultrasonic impact treatment.*** IIW Doc XIII-2004-04

[3] Hiroyuki Takamori, John W. Fisher. ***Tests of Large Girders Treated To Enhance Fatigue Strength.*** Transportation Research Board of the National Academies. Volumen 1696 / 2000

[4] c. A. Rodopoulos, sp. G. Pantelakis and m. P. Papadopoulos. ***The effect of ultrasonic impact treatment on the fatigue resistance of friction stir welded panels.*** Journal of materials engineering and performance. Volume 18, number 9, 1248-1257, doi: 10.1007/s11665-009-9385-y 2009

[5] Roy, Sougata, Ph.D., ***Experimental and analytical evaluation of enhancement in fatigue resistance of welded details subjected to post-weld ultrasonic impact treatment.*** Lehigh University, 2006, 402 pages; AAT 3203827

[6] Sougata Roy, John W. Fisher and Ben T. Yen. ***Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact Treatment (UIT).*** 2001

[7] M.M. Pedersen, O.Ø. Mouritsen ,M.R. Hansen, J.G. Andersen, J. Wenderby. ***Comparison of Post Weld Treatment of High Strength Steel Welded Joints in Medium Cycle Fatigue*****,** Aalborg University, Dept. of Mechanical Engineering, DK-9220, Denmark. University of Agder, Dept. of Engineering, NO-4876, Norway. HMF A/S, DK-8270, Denmark. 2010

[8] Glatier, A., and Statnikov, E. ***The influence of ultrasonic impact treatment on fatigue behavior of welded joints in high strength steel.*** IIW Doc XIII-1976-03

[9] Veli-Matti Lihavainen, Gary Marquis ***Estimation of fatigue life improvement for ultrasonic impact treated welded joints***. Lappeenranta University of Technology P.O.Box 20, FIN-53851 Lappeenranta, Finland 2004

[10] R. Hessert 1, j. Bamberg 1, w. Satzger 1, ***Ultrasonic impact treatment for surface hardening Of the aero-engine material in718*** *t.* Taxer 2 1 mtu aero engines, dachauer straße 665, 80995 munich, Germany 2 technische universität münchen, arcisstrasse 21, 80333 munich, germany

[11] J. Pressure. ***Effect of Ultrasonic Impact Treatment on the Stress Corrosion Cracking of 304 Stainless Steel Welded Joints***. Vessel Technol. -- October 2009 -- Volume 131, Issue 5, 051502 (5 pages)

[12] Statnikov Efim S***. Ultrasonic impact treatment on the stress corrosion cracking of 304 Stainless steel welded joints.*** Vessel Tecnol. October 2009. Volumen 131, Issue 5, 051502 (5 page)

[13] E. Sh. Statnikov et al., ***Ultrasonic Impact tool for strengthening welds and reducing residual stresses****,* New Physical Methods of Intensification of Technological Processes. 1977.

[14] Statnikov, E.S. ***Applications of operational ultrasonic impact treatment (UIT) technologies in production of welded joins.*** IIW Doc XIII-2050-05

Peter Schauman, Cristian keindorf. ***Experiments and simuations of welded joints with post weld treatment.*** Desing , Fabrication and Economy of Welded structures, 2008.

E. Statnikov et al., ***Specifications for weld improvement by ultrasonic impact treatment***. IIW. Doc XIII-1617-96.

Juan Asencio Lozano. ***Nuevos desarrollos para la mejora de características superficiales de cruzamientos de vía.***

Y. Kudryavtsev, J. Kleiman. ***Fatigue Life Improvement of Welded Elements by Ultrasonic Peening***. IIW Document XIII-2010-04
Lihavainen, V., Marquis, G and Statnikov. ***Fatigue strength of a longitudinal attachment improved by ultrasonic impact treatment.*** IIW Doc XIII-1990-03.

Langeneeker, B. ***Effects of ultrasonic on deformation characteristics of metal.*** IEE Transaction of sonic and Ultrasonics, 13(1), 1-7

BÖHLER. Características del Acero grado S700 [en línea], Disponible en: **http://www.bohler.be/french/files/S000FSp.pdf**

Norma técnica colombiana NTC 4005 revisada de la página **http://es.scribd.com/doc/50159426/NTC4005**