

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE
MATERIALES
VALPARAÍSO - CHILE**



**ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN
PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES**

PABLO ANTONIO ZAMBRANO ZAMBRANO

**Memoria de titulación para optar al título de Ingeniero Civil
Metalúrgico**

Profesor Guía: Sergio Estay Villalón

2019

Agradecimientos

Gracias a Dios, por entregarme las capacidades para culminar esta etapa universitaria y no abandonarme jamás.

A mi madre por su inmenso amor y demostrarme su fuerza para luchar día a día contra los peores pronósticos, sin duda eres mi mayor inspiración.

A mi padre por su ejemplo de esfuerzo diario y constante, gracias por enseñarme a confiar en Dios y ser un profesional en cada trabajo.

A Valentina por el apoyo en los momentos precisos, espero me sigas acompañando por mucho tiempo más.

A la Universidad Técnica Federico Santa María, personificada en las y los profesores y funcionarios del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Materiales y Minería de la Casa Central en Valparaíso.

A mis amigos y amigas, colegas, por todos los lazos fraternos formados en esta linda etapa académica.

Gracias al apoyo de todos ustedes es posible concluir esta tesis, vaya un abrazo para todos.

Resumen

Muchos de los procesos de fabricación, unión y terminación de piezas y estructuras metálicas producen esfuerzos residuales, que permanecen en su interior y eventualmente se suman a los esfuerzos aplicados externamente. Es el caso de procesos de fundición, conformado plástico, soldadura, tratamientos térmicos y superficiales, sólo por nombrar los más conocidos. Al permanecer en el interior de las piezas, los esfuerzos residuales se hacen partícipes de la respuesta mecánica frente a cargas externas, pudiendo provocar efectos tanto favorables como desfavorables. Entre los primeros se cuenta el mejoramiento de la resistencia a la fatiga debido a esfuerzos compresivos generados por procesos de nitruración o por granallado. Por su parte los esfuerzos residuales de tensión se asocian a efectos desfavorables como la fractura, motivo por el cual se hace necesario tomar acciones tendientes a evitarlos, eliminarlos o atenuarlos.

La atenuación o eliminación de esfuerzos residuales en aceros se realiza generalmente por medio de tratamientos de térmicos de post-calentamiento. En estos, los propios esfuerzos residuales producen pequeñas deformaciones plásticas locales, debido a la reducción del esfuerzo de fluencia del material por efecto de la temperatura. Todo esto controlado por la difusión atómica en estado sólido, por lo que la reducción de los esfuerzos residuales es proporcional a la temperatura y el tiempo de tratamiento. Una alternativa para producir alivio de esfuerzos residuales registrada en literatura técnica, es la aplicación de vibraciones sobre la pieza, lo que permite evitar el tratamiento térmico y los costos asociados a ello. Sin embargo la información disponible respecto de su eficacia en comparación con el tratamiento térmico es muy escasa así como respecto del efecto específico de las variables de su aplicación.

En este contexto, el presente trabajo plantea efectuar una comparación directa de ambos métodos de alivio, a partir de una situación de esfuerzos residuales originados por un proceso de soldadura. Para ello, se efectuó depósitos de soldadura en forma automática mediante el proceso de Arco Sumergido, sobre un conjunto de cupones correspondientes a planchas de acero estructural. A partir de

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

la condición inicial de soldadura, unos cupones fueron tratados térmicamente para alivio de tensiones de acuerdo a las recomendaciones del código ASME, mientras otras fueron expuestas a aplicación de vibraciones forzadas en diversas condiciones. La presencia de tensiones residuales en las planchas originales soldadas y las planchas con ambos tipos de tratamiento, fue verificada mediante el método de perforación de agujero ciego, según norma ASTM-E837.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el tratamiento por aplicación de vibraciones produce reducción de los esfuerzos residuales contenidos en planchas de acero con depósitos de soldadura. Sin embargo, la magnitud de la reducción de esfuerzos residuales resulta ser muy variada en función de las variables de aplicación, específicamente el tiempo de aplicación de las vibraciones y el voltaje aplicado en el equipo vibrador, lo que se relaciona con la amplitud de las vibraciones. En la mejor combinación de las variables, el método vibratorio alcanza una reducción de esfuerzos residuales del orden de un 60% de la reducción lograda por tratamiento térmico. Este resultado indica que el tratamiento de vibraciones claramente es menos efectivo que el tratamiento térmico, pero no descalifica la utilidad que puede tener el método, por sí solo o en combinación con temperaturas menores que las usadas en el tratamiento térmico tradicional.

Índice de Materias

Resumen.....	3
Índice de Materias	5
Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas.....	10
1. Antecedentes Generales	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. Definición del problema.....	13
1.3. Objetivos.....	13
1.3.1. Objetivo General.....	13
1.3.2. Objetivos Secundarios.....	13
2. Marco Teórico	14
2.1. Origen de Esfuerzos Residuales en Soldadura	14
2.2. Métodos de Alivio de Esfuerzos Residuales.....	18
2.2.1. Métodos Térmicos.....	18
2.2.2. Métodos Mecánicos	20
2.3. Vibraciones	22
2.4. Fenomenología de las vibraciones.....	24
2.5. Vibraciones para el Alivio de Esfuerzos Residuales	26
2.6. Métodos de medición de Esfuerzos Residuales.....	34
2.6.1. Difracción de Rayos X	34
2.6.2. Ultrasonido.....	35
2.6.3. Método del Agujero Ciego.....	37
2.7. Simulación de Esfuerzos Residuales	40
3. Desarrollo Experimental	43
3.1. Caracterización de Cupones	43
3.2. Generación de Esfuerzos Residuales.....	45
3.3. Tratamiento de Cupones	49
3.3.1. Tratamientos Térmicos	51
3.3.2. Tratamiento Vibracional.....	52
3.4. Caracterización de la Unión Soldada.....	54
3.5. Medición de Esfuerzos Residuales	58

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

3.5.1.	Preparación de superficies.....	58
3.5.2.	Lijado de puntos de medición.....	59
3.5.3.	Pegado de Rosetas.....	60
3.5.4.	Perforación y Adquisición de datos	65
3.6.	Cálculo de Esfuerzos	67
4.	Resultados y Discusión.....	71
4.1.	Esfuerzos Residuales Medidos	71
4.2.	Condiciones Experimentales	81
5.	Conclusiones y Recomendaciones	83
6.	Referencias	86
7.	Anexos	88

Índice de Figuras

Figura 1	Esquema de placa depositada con similitud en la analogía de las tres barras. A la derecha, gráfico de esfuerzos según temperatura alcanzada por la barra m.	15
Figura 2	Representación esquemática del proceso de soldadura y la generación de esfuerzos residuales (ER). (a) Esquema de pasó del arco eléctrico. (b) Temperatura en cada sección. (c) Esfuerzos σ_x en cada sección.	16
Figura 3	Distribución de esfuerzos paralelos (a) y transversales (b) al cordón de soldadura depositado en el eje X. σ_m corresponde al máximo esfuerzo y es de tensión; b corresponde al ancho de la zona de tensión.	17
Figura 4	(A) Porcentaje de esfuerzo relajado versus temperatura de tratamiento, a diferentes tiempos. (B) Promedio de esfuerzo remanente después de 4 horas de tratamiento versus temperatura, para aceros con diferente esfuerzo de fluencia.	20
Figura 5	Esquema de Hammer Peening o Martillado.	21
Figura 6	Esquema del impacto de una partícula de granalla y la sección transversal de la huella que deja.	21
Figura 7	Martillo neumático, con diferentes cabezales y con variador de frecuencia de martilleo.	22
Figura 8	Gráfico armónico de un sistema vibratorio.	24
Figura 9	Comportamiento de histéresis mecánica. (a) Gráfico original de esfuerzo-deformación. (b) Nuevo gráfico de esfuerzo deformación después de la carga inicial.	25
Figura 10	Curvas de vibraciones realizadas a un material, donde se muestra la diferencia entre un estado con EERR (negro) y un estado aliviado (roja y azul).	29
Figura 11	Gráficos de distribución de ER en las muestras de acero EN3b laminadas en frío a diferentes porcentajes de reducción (Izquierda) y distribución de ER para muestras con 1% de reducción en laminado con aplicación de VSR a diferentes cargas.	32
Figura 12	Efecto del número de ciclos con carga de 250 [MPa] sobre los ER.	33
Figura 13	Corrimiento del pulso de la difracción a medida que cambia el ángulo de refracción.	35
Figura 14	Cambios en la velocidad de onda ultrasónica longitudinal (CL) y ondas de corte de polarización ortogonal (CSX3; CSX2) en función de tensión mecánica en (a) Acero A; (b) Acero B; y (c) Aleación de Aluminio.	37

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Figura 15	Rosetas de tres tipos. Con 3 galgas (Tipo A y B) y con 6 galgas (Tipo C).	39
Figura 16	Efecto del espesor en la generación de esfuerzos residuales. $V = 6$ [mm/s] y temperatura inicial de 70[°F].	41
Figura 17	Esfuerzos para la placa de 1 [in] a diferentes temperaturas iniciales.	42
Figura 18	Esfuerzos para placa de 1 [in] a diferentes velocidades de pasada.	42
Figura 19	Metalografías a 100X (izquierda) y a 200X (derecha).	44
Figura 20	Metalografías desde sección longitudinal, para descubrir el bandeado, a 50X (izquierda) y 100X (derecha).	45
Figura 21	Partes del carro móvil que contiene la antorcha de SAW. (1) Guía de posición. (2) Torcha y descarga de fundente. (3) Carrete de material de aporte/electrodo. (4) Tolva de fundente. (5) Rueda y riel. (6) Pieza soldada.	46
Figura 22	Fotografías del carro SAW en funcionamiento, depositando cordón de soldadura sobre placas en estudio.	47
Figura 23	Resultado del proceso SAW, con las placas ya separadas, pero ordenadas en forma creciente.	48
Figura 24	Horno de tratamiento térmico de fabricación propia en ECASO. 4 de sus 3 quemadores en funcionamiento.	51
Figura 25	Mesa vibradora junto a la placa de prueba y sistema de medición de vibraciones (caja roja).	53
Figura 26	Cordón de soldadura a 50x (a la izquierda) y a 100x (a la derecha).	54
Figura 27	Límite del cordón (zona clara) con la ZAT (zona oscura) a la izquierda. A la derecha, ZAT con crecimiento de grano. Ambas imágenes a 50X	54
Figura 28	Zonas de la ZAT más alejadas. Se observa un grano más pequeño. Imágenes a 50X	55
Figura 29	Sección transversal del cordón de soldadura del cupón 3. A la izquierda se muestra un macroataque y a la derecha las mediciones de dureza realizadas, donde las dos líneas paralelas corresponden a las series Alta y Baja, y la línea perpendicular a la medición en profundidad.	56
Figura 30	Mediciones de dureza bajo el cordón de soldadura a dos diferentes aturas.	56
Figura 31	Marcas de la medición de dureza superficial desde el límite del cordón en el cupón 3.	57
Figura 32	Mediciones de dureza superficial a diferentes distancias del límite del cordón.	57
Figura 33	Cupón N°3 en baño ácido para decapado químico bajo campana. Se observa la solución verdosa cercano al metal e incolora en las esquinas.	59

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Figura 34	Fotografías de pasos del pegado de estampillas. En la primera imagen se ven las líneas de guía sobre la cinta adhesiva. En las siguientes fotos, se ve la estampilla pegada y la distancia al cordón.	61
Figura 35	Plano roseta 062 UM.	61
Figura 36	Estampilla y trozo de tarjeta estañadas (izquierda) y cables conectados desde cada punto de la estampilla (6 puntos) a la tarjeta (3 individuales y 3 en pares).	62
Figura 37	Instalación final de la estampilla, lista para realizar la perforación y medición.	63
Figura 38	Figura 38. Conexión utilizada (cuarto de puente) y diferentes formas de conectar el equipo según requerimiento (cuarto de puente, medio puente y puente completo).	64
Figura 39	Secuencia de perforación de "búsqueda del cero"	66
Figura 40	Roseta antes y después de la perforación. Se observa el fondo plano del orificio y marcas de la fresa en el borde del agujero.	67
Figura 41	Datos de deformación versus profundidad.	68
Figura 42	Típico gráfico de porcentaje de deformación versus razón de profundidad.	69
Figura 43	Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 1.	73
Figura 44	Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 2.	73
Figura 45	Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 3.	74
Figura 46	Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 4.	74
Figura 47	Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 5.	75
Figura 48	Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 6.	75
Figura 49	Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 7.	76
Figura 50	Esquema y banda de ángulos de dirección para ambos lados del cordón de soldadura (línea negra).	81

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Índice de Tablas

Tabla 1	Propiedades del acero EN3b y composición química.	30
Tabla 2	Composición química obtenida de análisis químico y rangos de la norma ASTM A36.	43
Tabla 3	Parámetros del proceso SAW aplicado a las placas en estudio.	49
Tabla 4	Resumen de tratamientos aplicados a cada cupón.	50
Tabla 5	Datos de la medición 1 del cupón 1.	71
Tabla 6	Valores de p, q, t y sus porcentajes con respecto al último valor de cada uno, para el cupón 1, primera medición.	72
Tabla 7	Valores calculados a partir de constantes a y b, para Do/D de 0,35. Cupón 1, medición 1.	77
Tabla 8	Resultados finales para la medición 1 del cupón 1. Valores de esfuerzo en mega Pascales.	77
Tabla 9	Resumen de resultados con valores de esfuerzos máximos y porcentaje remanente con el Caso Base (Cupón 3).	78
Tabla 10	Datos de la segunda medición del cupón 1.	88
Tabla 11	Datos de la primera medición del cupón 2.	88
Tabla 12	Datos de la segunda medición del cupón 2.	88
Tabla 13	Datos de la primera medición del cupón 3.	89
Tabla 14	Datos de la segunda medición del cupón 3.	89
Tabla 15	Datos de la primera medición del cupón 4.	89
Tabla 16	Datos de la segunda medición del cupón 4.	90
Tabla 17	Datos de la primera medición del cupón 5.	90
Tabla 18	Datos de la segunda medición del cupón 5.	90
Tabla 19	Datos de la primera medición del cupón 6.	91
Tabla 20	Datos de la segunda medición del cupón 6.	91
Tabla 21	Datos de la primera medición del cupón 7.	91
Tabla 22	Datos de la segunda medición del cupón 7.	92
Tabla 23	Valores de constante a, según razón de profundidad/D y Do/D.	92
Tabla 24	Valores de constante b, según razón de profundidad/D y Do/D.	93
Tabla 25	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 1, medición 2, Do/D = 0,37.	93
Tabla 26	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 2, medición 1, Do/D = 0,36.	94
Tabla 27	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 3, medición 1, Do/D = 0,37.	95
Tabla 28	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 3, medición 2, Do/D = 0,37.	96
Tabla 29	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 4, medición 1, Do/D = 0,39.	97
Tabla 30	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 5, medición 1, Do/D = 0,36.	98

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 31	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 5, medición 2, Do/D = 0,38.	99
Tabla 32	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 6, medición 1, Do/D = 0,36.	100
Tabla 33	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 6, medición 2, Do/D = 0,38.	101
Tabla 34	Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 7, medición 1, Do/D = 0,37.	102
Tabla 35	Valores finales para cada medición. Esfuerzos en MPa, y ángulos en grados.	102

1. Antecedentes Generales

1.1. Introducción

La industria manufacturera de piezas metálicas ya sea por procesos de fundición, mecanizado y/o soldadura está en constante mejora de sus procesos, muchos de ellos ampliamente estudiados, con el fin de obtener la mejor performance de sus productos al menor costo posible.

Uno de los factores importantes para el buen desempeño de los productos son los esfuerzos residuales (EE. RR), que afectan silenciosamente la resistencia mecánica de las piezas, haciendo que exista un nivel de tensiones previo a la aplicación de cualquier otra carga. Los EE. RR. son esfuerzos internos del material que se manifiestan, aunque no exista una carga externa aplicada a la pieza, son auto-equilibrantes (no producen torque ni movimiento), y se encuentran tanto en rango elástico como plástico. Por lo general poseen una categorización negativa, ya que se suman a los esfuerzos aplicados externamente y al desconocer sus valores puede existir una sumatoria de cargas que supere la carga de fluencia de un material fallando catastróficamente, pero en casos particulares, pueden ser positivos, generalmente cuando estos esfuerzos son del tipo compresivos, que consecuentemente ayudan a reducir los esfuerzos que producen fatiga.

La aparición de tensiones residuales se debe a diferentes factores mecánicos-metalúrgicos, como la laminación de una plancha, el trefilado en un alambre, o en algún proceso que implique un ciclo térmico brusco, como el enfriamiento de piezas fundidas, o en la soldadura. Este último caso es el presente en ECASO S.A, una empresa dedicada a la fabricación de maquinaria industrial forestal, ubicada en la ciudad de Talca, Chile; en la que se utiliza principalmente la unión por soldadura y el mecanizado de piezas de acero para su proceso productivo.

En esta empresa, se implementó un método de alivio de EE. RR. a través de vibraciones y se sigue buscando un mayor control del proceso vibratorio, por lo que es necesario tener un mayor conocimiento del funcionamiento de las vibraciones y las variables que controlan este fenómeno (frecuencia, amplitud, tiempo de

vibración). Cabe mencionar que, de todas formas, por norma de fabricación y exigencia de algunos clientes, el tratamiento de recocido convencional de alivio de esfuerzos se realiza independientemente se haya hecho o no vibrar la pieza.

1.2. Definición del problema

Para el correcto funcionamiento y posterior control de cualquier proceso de fabricación, en ECASO o cualquier industria, es necesario una medición de alguna de las variables controladoras de aquel proceso. Al no tener ninguna referencia científicamente validada de un correcto o mal funcionamiento, se hace imposible mejorar dicho proceso. En el caso de ECASO, al aplicar un tratamiento de vibraciones con el fin de disminuir el nivel de EE. RR en piezas soldadas, donde conocen las consecuencias cualitativamente por pruebas hechas en sus instalaciones de tales vibraciones, miden frecuencias eléctricas de los motores de masa excéntrica utilizados para aplicar las vibraciones, por lo que se deben hacer pruebas para optimizar los tiempos y recursos utilizados, modificando esta variable y midiendo otras que puedan gobernar las vibraciones. De esta forma se podrá conocer la real efectividad de las vibraciones y donde se debe apuntar el control del proceso.

¿A qué variables se debe apuntar el control de un tratamiento de vibraciones para el alivio de esfuerzos residuales en Manufacturas ECASO?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar el efecto de las vibraciones controladas en el alivio de esfuerzos residuales originados por un proceso de soldadura y compararlo con un tratamiento térmico post soldadura como forma de reducir los EE. RR. en una pieza.

1.3.2. Objetivos Secundarios

- Determinar algún parámetro con el cual controlar la aplicación de este método en Manufacturas ECASO, ya sea la frecuencia de vibración, el tiempo, la amplitud, etc.

- Implementar un procedimiento experimental para medir en forma confiable esfuerzos residuales en piezas soldadas.

2. Marco Teórico

2.1. Origen de Esfuerzos Residuales en Soldadura

Los EE. RR. en las piezas y estructuras soldadas, independiente del proceso de soldadura utilizado, se originan debido a que son calentadas localmente por una fuente de calor dinámica que produce una distribución de temperatura no uniforme y que cambia a medida que progresa la soldadura a lo largo del cordón y mientras pasa el tiempo. Durante el ciclo térmico de soldadura, se producen esfuerzos térmicos transitorios en el cordón de soldadura y la zona circundante. Toda esta zona también experimenta esfuerzos y deformaciones durante la solidificación y el enfriamiento. [1]

Para explicar la presencia de los esfuerzos residuales se han propuesto diferentes teorías y una de ellas dice que durante la soldadura al arco se producen deformaciones plásticas y elásticas originadas por los cambios volumétricos del material. [2]

Una simplificación para explicar los EE. RR. en uniones soldadas es posible gracias a la analogía de las tres barras señalada en la Figura 1. De izquierda a derecha de la figura se observa una placa con un cordón de soldadura depositado en su centro, posteriormente se observan tres barras montadas entre dos bloques rígidos. En el gráfico de la Figura 1, se relaciona la temperatura de la barra m con los esfuerzos que va presentando a medida cambia la temperatura.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

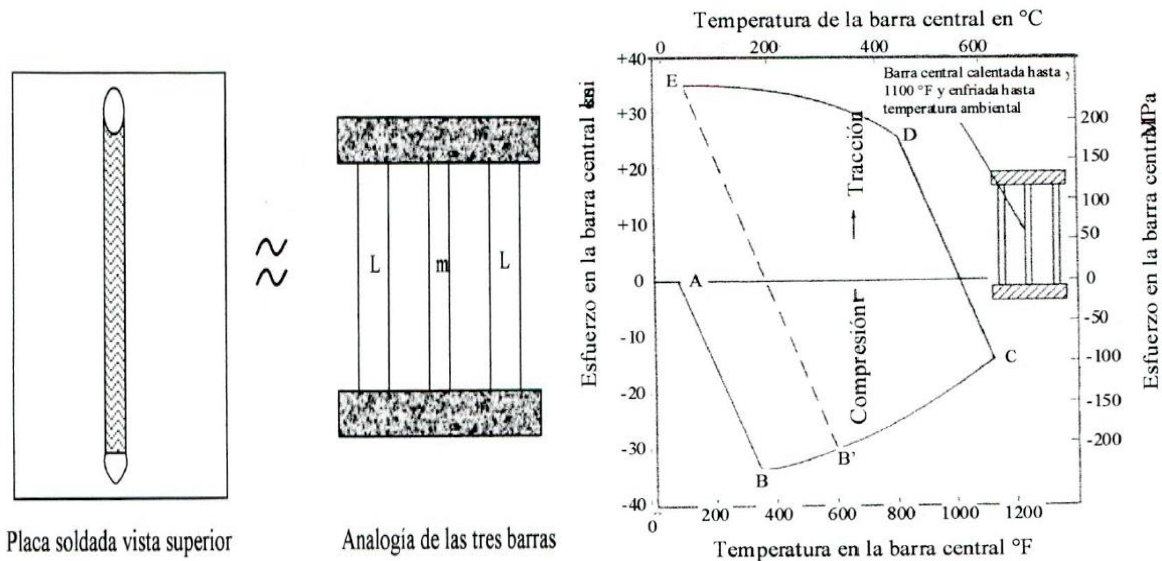


Figura 1. Esquema de placa depositada con similitud en la analogía de las tres barras. A la derecha, gráfico de esfuerzos según temperatura alcanzada por la barra m. [3]

Desde el punto A al B, la barra m es calentada lo suficiente para que se expanda y debido a los bloques rígidos que restringen su movimiento, aparezcan esfuerzos compresivos, lo que se traduce en valores negativos mostrados en el gráfico. A medida que se sigue calentando la barra disminuye la resistencia mecánica, el acero sufre deformación plástica en caliente y los esfuerzos disminuyen (en valor absoluto) hasta llegar al punto C. La línea BB'C corresponde al esfuerzo de fluencia del acero a cada temperatura dada. Posterior a esto se detiene el calentamiento y comienza el enfriamiento. Consecuentemente la contracción volumétrica del metal, pasando de esfuerzos de compresión a tracción, y debido a la deformación plástica producida anteriormente, la barra central queda con una carga remanente, correspondiente a los EE. RR. Las líneas AB, EB' y DC poseen igual pendiente y se observa que si se detuviese el calentamiento de la barra m a la temperatura de B', el nivel de tensiones residuales sería el mismo que resulta al calentar hasta C.

En la Figura 2, se muestran los cambios de temperaturas (b) y la distribución de tensiones residuales generadas a lo largo del proceso de soldadura en dirección "X" o bien σ_x (c). En (a) se observa el avance de la fuente de calor (arco eléctrico), donde se ve un pequeño ovalo correspondiente a la zona fundida, piscina o pileta, la cual avanza en dirección "X". La zona achurada es el área correspondiente que sufre

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

deformación plástica y la no achurada corresponde a deformación elástica. La distribución final de esfuerzos (corte D-D) se explica de manera similar a lo que ocurre en el gráfico de la Figura 1. La parte central, donde se deposita el cordón de soldadura, cuando se encuentra a la más alta temperatura (corte B-B) sufre una expansión volumétrica que implica la aparición de esfuerzos compresivos debido a la restricción de movimiento que entrega la misma placa fría. Posteriormente, en el corte C-C, el cordón comienza a enfriarse y por consecuencia a contraerse, pero el ciclo térmico es diferente a los costados del cordón, produciendo los esfuerzos de tensión en el centro y compresión a los costados. Esta representación esquemática corresponde a un ejemplo de una soldadura en una placa delgada, por lo que se asume que la distribución de esfuerzos es uniforme con respecto a la profundidad.

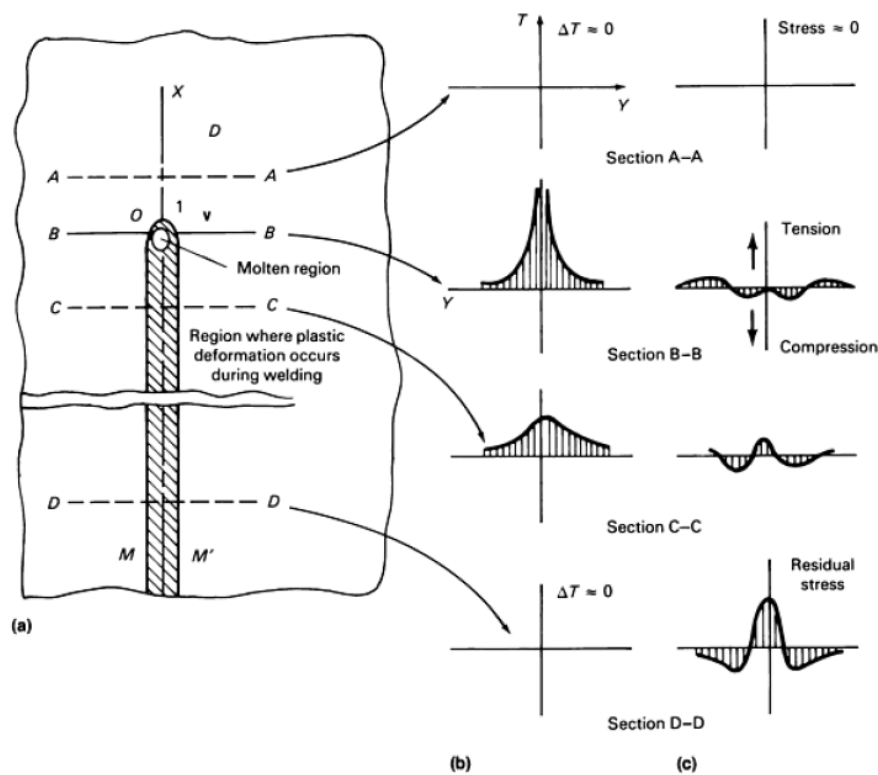


Figura 2. Representación esquemática del proceso de soldadura y la generación de esfuerzos residuales (ER). (a) Esquema de pasó del arco eléctrico. (b) Temperatura en cada sección. (c) Esfuerzos σ_x en cada sección. [1]

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

A lo largo de los ejes coordenados, la distribución de esfuerzos es diferente y se presentan esfuerzos compresivos y de tensión, tal y como lo muestra la Figura 3. Con los esquemas se puede corroborar el auto-equilibrio de los EE. RR, además de presentar esfuerzos longitudinales de tensión cercanos al cordón y de compresión al costado de las zonas de tensión, todos estos, paralelos al cordón (Ver Figura 3.a). La distribución de los esfuerzos σ_y , se muestra en la Figura 3.b, donde se ve que en la zona central de la plancha hay esfuerzos de tensión, pero menos intensos que en el caso de los esfuerzos longitudinales. Las curvas 1 y 2 en la Figura 3.b, corresponden a los esfuerzos generados si no se restringe exteriormente la plancha y si se restringe el movimiento al momento de soldar, respectivamente, es decir que, si se restringe el desplazamiento, mayor será el nivel de ER.

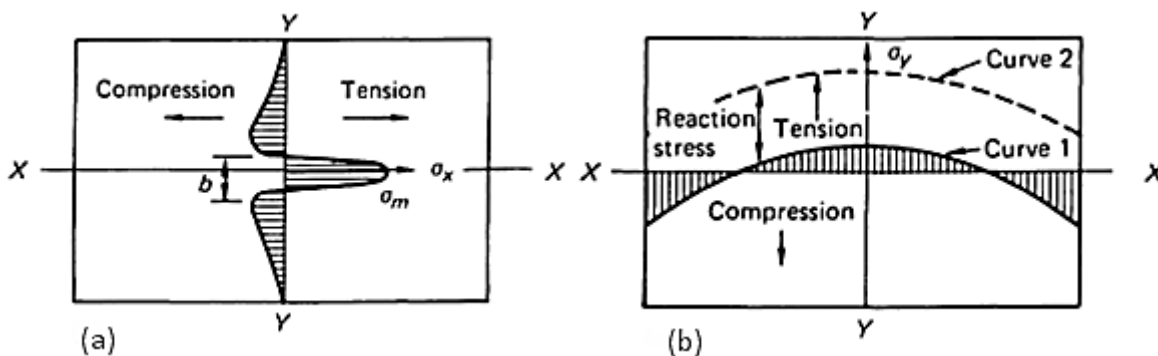


Figura 3. Distribución de esfuerzos paralelos (a) y transversales (b) al cordón de soldadura depositado en el eje X. σ_m corresponde al máximo esfuerzo y es de tensión; b corresponde al ancho de la zona de tensión. [1]

Las principales variables que influyen en la generación de EE. RR. en procesos de soldadura son:

- Calor de aporte: corresponde al flujo de energía entregado por la fuente de calor recibido por el metal base y el metal de aporte (en caso de que exista). Mientras mayor sea el calor de aporte, mayor serán las contracciones y dilataciones térmicas, por lo que mayores tensiones residuales se generarán.
- Pre calentamiento: Al calentar la pieza antes de comenzar a soldar, se logra disminuir el gradiente térmico entre el metal base y el cordón de soldadura. Si disminuye el gradiente térmico, disminuyen los esfuerzos térmicos y por consecuencia, la generación de EE. RR.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

- Libertad de movimiento: mientras más restringida esté la contracción o la elongación de la pieza soldada, mayores serán las tensiones. Si un cuerpo se deforma, los esfuerzos se relajan, por lo que la no-deformación implica una acumulación de esfuerzos.
- Espesor de la plancha: este punto está ligado con el anterior ya que, al tener una pieza de gran espesor, es poco probable que esta experimente alguna deformación (debido a que se debe generar una gran fuerza), y esto no sucede con una plancha delgada que, al unir la con otra a tope, se aprecia a simple vista la deformación que sufren debido a la unión soldada.

Los esfuerzos residuales repercuten en el desempeño del material, pudiendo generar grietas y ayudando a su propagación. También afectan la estabilidad dimensional de las piezas y producen fenómenos como la tenso-corrosión, entre otros. Los efectos de los esfuerzos residuales pueden afectar negativa o positivamente, estas y otras propiedades dependiendo si son esfuerzo de tensión o compresión respectivamente, pero siempre están auto-equilibrados, es decir, la sumatoria de todos los esfuerzos es igual a cero, por lo que son imperceptibles. [1]

2.2. Métodos de Alivio de Esfuerzos Residuales

2.2.1. Métodos Térmicos

El tratamiento térmico post soldadura (PWHT por sus siglas en inglés) es el método tradicional y más común para la reducción o alivio de EE. RR. en las uniones soldadas y piezas en general. Las piezas son calentadas lenta y controladamente hasta temperaturas cercanas a los 600°C de manera que se evita la creación de nuevas tensiones. La pieza luego es mantenida a esa temperatura por una cantidad de tiempo predeterminada. A esta temperatura el punto de fluencia del metal disminuye como para provocar una deformación plástica en las zonas bajo tensión residual hasta llevarlo a un nuevo estado de tensiones menores. Todo esto es acompañado por la difusión atómica, que lleva a un acomodamiento de las dislocaciones. [2]

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

La aplicación del tratamiento térmico se puede estandarizar y tiene una serie de recomendaciones dictadas por ASME (The American Society of Mechanical Engineers). Estos documentos, actualizados cada año, entregan importante información con respecto al tiempo del tratamiento, temperaturas que se deben alcanzar y mantener, según el espesor del acero a tratar [4]. Cada tratamiento térmico o post-calentamiento, como también prácticas de precalentamientos tienen como finalidad la disminución y la no-generación de EE.RR. correspondientemente.

En la Figura 4 se muestra gráficamente el efecto del tratamiento de postcalentamiento sobre los EE. RR. en uniones soldadas. En (a) se observa que, manteniendo la temperatura del tratamiento existe una diferencia de aproximadamente 10% en el alivio de esfuerzos entre el menor y mayor tiempo. Esta diferencia es más notoria a temperaturas más bajas y disminuye a medida que la temperatura aumenta. Con esto se cumple, como en la mayoría de los tratamientos térmicos, que la temperatura es la variable que gobierna este proceso y el tiempo cumple un rol secundario. Por otro lado, en la Figura 4 (b), se ve que a 600 [°C] el esfuerzo remanente después de 4 horas de tratamiento, independiente de las condiciones iniciales del acero (esfuerzo de fluencia), es menor al 10% del esfuerzo inicial.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

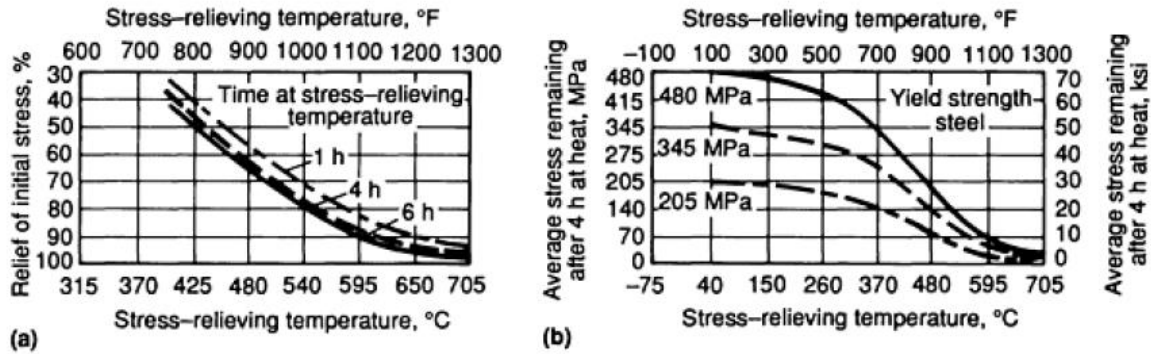


Figura 4. (A) Porcentaje de esfuerzo relajado versus temperatura de tratamiento, a diferentes tiempos. (B) Promedio de esfuerzo remanente después de 4 horas de tratamiento versus temperatura, para aceros con diferente esfuerzo de fluencia. [1]

2.2.2. Métodos Mecánicos

Todo método mecánico para alivio de EE. RR. implica una deformación plástica que permita la relajación de las zonas de tensión y/o compresión o para generar zonas de esfuerzos beneficiosos, como se podrían clasificar las áreas de esfuerzos compresivos. A continuación, se mencionan algunos de los tratamientos mecánicos más comunes y conocidos para el alivio de tensiones en materiales metálicos.

El martillado o Hammer peening, consiste en aplicar una serie de golpes justo en el borde del cordón de soldadura o en la ZAT (Zona Afectada Térmicamente) con un martillo-punzón, generalmente neumático, generando un surco con la forma de la punta del martillo. Este surco producido por la deformación del golpe del martillo tiene una zona compresiva alrededor de él. En la Figura 5 se puede ver un esquema del Hammer peening, donde las flechas verticales indican el movimiento del martillado y las flechas horizontales, el movimiento del aparato. El acercamiento corresponde al surco dejado por la huella del martillado.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

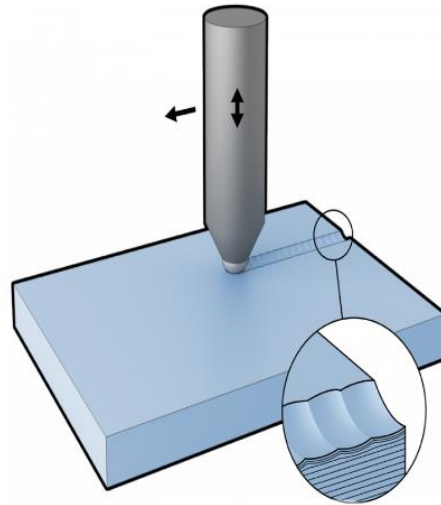


Figura 5. Esquema de Hammer Peening o Martillado.

El Shot peening o granallado, tiene el mismo fundamento que el martillado, es decir, producir una deformación con algún elemento o herramienta con la finalidad de generar zonas compresivas que neutralicen o minimicen los esfuerzos de tracción. El granallado consiste en bombardear la pieza con diminutas partículas esféricas, a alta velocidad. Esto producirá una capa superficial con esfuerzos únicamente compresivos de toda la zona granallada. La Figura 6 muestra esquemáticamente el efecto del choque de las partículas sobre las piezas, y la generación de la zona compresiva.

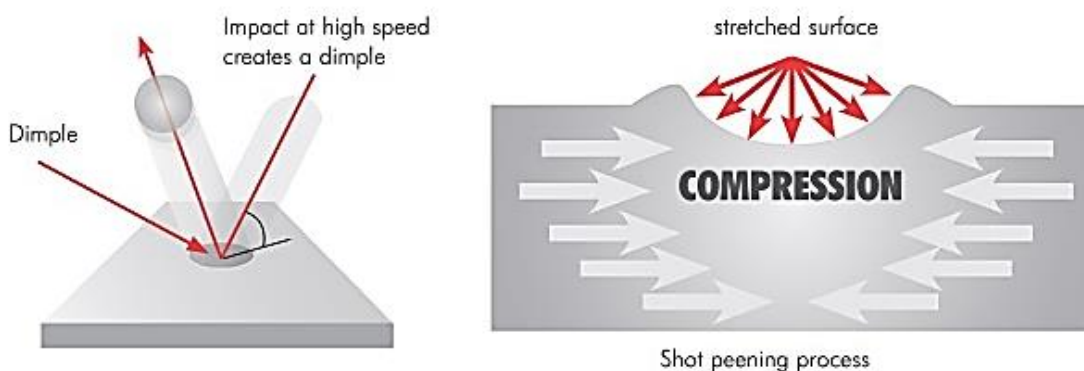


Figura 6. Esquema del impacto de una partícula de granalla y la sección transversal de la huella que deja.

El Needle peening es similar al martilleo, salvo que en el cabezal del martillo-punzón en vez de un solo cabezal, hay agujas o punzones más delgados, por lo que la huella ya no será un surco grueso, sino que uno mucho más delgado y tantos como

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

agujas tenga la punta del punzón. En la Figura 7 se muestra la pistola o martillo con diferentes cabezales, correspondientes a las “agujas”.



Figura 7. Martillo neumático, con diferentes cabezales y con variador de frecuencia de martilleo.

El Ultrasonic peening, al igual que los otros tratamientos peening, se realiza con una pistola similar a la de la Figura 7, salvo que esta vez el cabezal transmite un ultrasonido que hace vibrar el sólido provocando un acomodo de las zonas cercanas al cabezal, aliviando los esfuerzos residuales, y por la combinación entre el ultrasonido y el martillado, se genera una pequeña deformación con las mismas consecuencias que en el hammer peening, esto es zonas compresivas.

Todos estos métodos son beneficiosos para un alivio de esfuerzos, sin embargo, el exceso de deformación puede producir problemas adicionales, como agrietamientos, pero un tratamiento bien aplicado puede ser positivo incluso para alargar la vida de piezas sometidas a fatiga.

2.3. Vibraciones

Para comprender mejor el método de vibraciones para el alivio de EE. RR, es necesario entender qué son las vibraciones. Una definición general es citada a continuación *“Es la variación con respecto al tiempo, de la magnitud de un parámetro que define, total o parcialmente, el estado de un sistema mecánico, eléctrico, económico, biológico, con respecto a una referencia específica, cuando la magnitud del parámetro es alternativamente mayor y menor que la de referencia.”* [5]. Esta definición, para el tema de estudio es muy amplia, por lo que la siguiente

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

definición queda más acotada a las vibraciones mecánicas, *“todos los cuerpos que poseen masa y elasticidad, son capaces de vibrar. Una vibración mecánica es el movimiento de una partícula o cuerpo que oscila alrededor de una posición de equilibrio”* [6].

Además, es necesario remarcar que existe un mundo de clasificación de las vibraciones, ya sean determinísticas o probabilísticas, periódicas o aperiódicas, etc, sabiendo esto, se puede obtener un periodo, frecuencia y amplitud de vibración para un sistema o cuerpo que oscila.

Hay dos formas en las que se puede hacer vibrar a un sistema o cuerpo, las vibraciones libres y las forzadas. Cualquier sistema elástico puede tener una vibración libre por causa de un impulso inicial, como un golpe, donde el movimiento se mantendrá únicamente por las fuerzas de restitución inherentes al mismo. El sistema bajo vibración libre vibrará en una o más de sus frecuencias naturales, dependientes de la distribución de su masa y rigidez.

La vibración forzada se produce cuando al sistema se le aplican fuerzas perturbadoras externas. Si la excitación es oscilatoria, ya sea periódica o no, como la de un sismo, el sistema es obligado a vibrar a la frecuencia de la perturbación, si esta es igual a las frecuencias naturales del sistema, se produce un fenómeno llamado “resonancia”, en este caso tienen lugar oscilaciones peligrosamente grandes, ya que la resonancia es el estado de oscilación donde se alcanza la mayor amplitud de vibración; así la falla por resonancia de estructuras como puentes o edificios es una peligrosa posibilidad que debe tenerse muy en cuenta. Por este motivo el cálculo de las frecuencias naturales de vibración es de gran importancia en el diseño sísmico de estructuras, y no tan solo sísmico, sino también la vibración por vientos, por motores instalados en la misma estructura que los soporta, etc. [6]

En la Figura 8 se puede observar un gráfico típico de amplitud versus frecuencia de vibración, o conocido también como una curva armónica. En esta figura se ven tres zonas. La zona 1 corresponde a una zona donde la frecuencia de oscilación no es lo suficientemente poderosa para generar una perturbación que haga vibrar con una

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

dislocaciones. En la Figura 9 se observa el fenómeno descrito, donde el punto de fluencia A se traslada a A' y las rectas OEA tiene la misma pendiente que la recta O'E'A' en (a). En (b) el punto A' es similar al punto 1, y las curvas OA1 y OB1 corresponden a la carga y descarga cíclica respectivamente.

El área ensombrecida en la Figura 9.b corresponde a la energía disipada en un ciclo, y esta área es mayor al aplicar una carga cíclica con una frecuencia sub armónica. [2] Esta carga cíclica puede corresponder a una vibración, por lo que no solo es necesario una frecuencia en la zona sub armónica, sino que también una perturbación lo suficientemente poderosa para generar una deformación local que genere el lazo de histéresis mecánica, necesario para la disipación de energía en el material y su consiguiente alivio de tensiones.

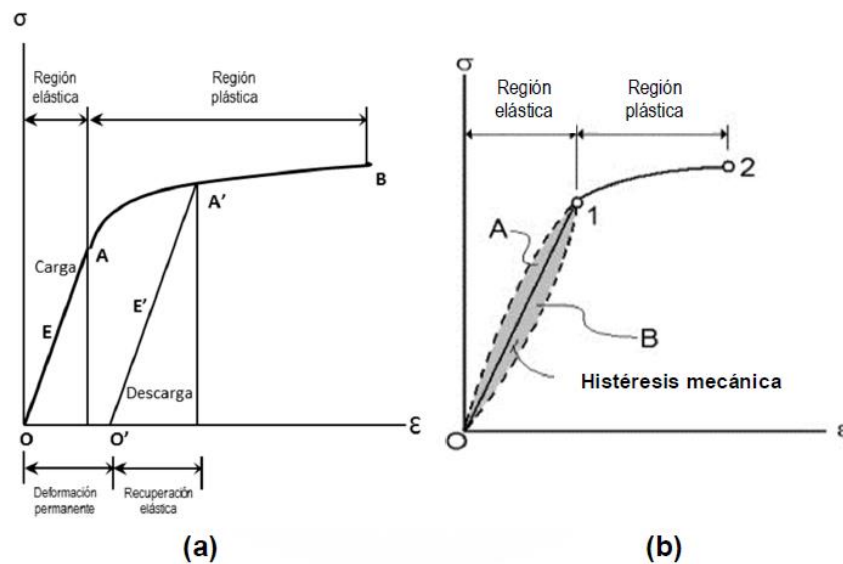


Figura 9. Comportamiento de histéresis mecánica. (a) Gráfico original de esfuerzo-deformación. (b) Nuevo gráfico de esfuerzo deformación después de la carga inicial. [2]

Es necesario mencionar que, si la frecuencia aplicada en la carga cíclica corresponde a la frecuencia pulso del armónico, o frecuencia natural de resonancia, la disipación de energía es mínima o nula, por lo que es absorbida por el material, generando grietas y provocando fallas en muy pocos ciclos. Esta es la razón de lo perjudicial que puede ser para el metal vibrar a esta frecuencia.

2.5. Vibraciones para el Alivio de Esfuerzos Residuales

Según una recopilación de información de métodos para relajar EE. RR. de la Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba; en el VSR (por la abreviación en inglés de Vibratory Stress Relief) se induce una vibración producida por un motor de masa excéntrica con control de RPM sobre la pieza. Variando la velocidad, en algún punto se alcanza la frecuencia de resonancia del sistema, la que se mantiene un periodo de tiempo relacionado con el peso del elemento a tratar, usualmente varía entre 10 a 30 minutos. [7]

Los autores señalaron además, que la reducción de los esfuerzos residuales es una función del número de ciclos de carga impuestos, donde la mayor reducción ocurre en el primer ciclo del tratamiento, donde cada ciclo corresponde a un tiempo de vibración aplicado a una frecuencia de resonancia o armónica, luego algunas nuevas reducciones tienen lugar en algunos ciclos más y una pequeña reducción ocurre con un largo número de ciclos. Realizar vibraciones de mucho tiempo y a altas frecuencias no sería recomendable, ya que pueden ocurrir algunos cambios no metalúrgicos, si no mecánicos, y se forman grietas de fatiga. Se cree que la energía vibratoria introducida en la pieza reorganiza la estructura de la red cristalina con lo que alivia la tensión, esto de forma similar a la energía que entrega un recocido térmico. El material no distingue de que forma llega la energía, simplemente la utiliza para reducir la suya a la forma más estable y esto es alineando las dislocaciones presentes.

Para una exitosa aplicación industrial de este método se sugieren algunas exigencias:

- Una geometría relativamente simple y la aplicación de múltiples modos de vibración. Es necesario tener en cuenta todas las áreas de la estructura para un alto alcance vibracional. (Los equipos cuentan con un rango de acción cercano a una esfera de 3 [m] de radio)

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

- Grandes amplitudes de vibración con esfuerzos en el orden de los límites de fatiga del material deben aparecer para un mejor porcentaje de relajación de los EE. RR.
- El material debe ser susceptible a la relajación de esfuerzos por vibración, es decir, debe ser capaz de propagar una onda vibratoria y mantener los parámetros de esta (amplitud, frecuencia, velocidad de propagación, entre otros) en el rango de acción del método. [8]

En circunstancias que no se especifican, se puede lograr una eliminación parcial de los EE. RR. por VSR, pero esto sucede con prácticamente todos los tratamientos, nunca será posible eliminar la totalidad de los defectos con un tratamiento. El VSR no produce cambios en la microestructura del material, por lo que cuando se trata una pieza soldada, la ZAT (Zona Afectada Térmicamente) se mantendrá en las mismas condiciones, microestructuralmente hablando.

G. Rodero [8], señaló que el VSR es un tratamiento relativamente simple, en el cual se inducen vibraciones armónicas o sub armónicas con gran amplitud en el material, donde el equipamiento habitual consiste de una fuente eléctrica conectada a un motor que gira excéntrico (el cual entrega la energía) y un acelerómetro (transductor) que registra la frecuencia de vibración en la pieza de trabajo.

Rodero propuso que el material presenta un alivio de ER. RR. cuando las dislocaciones presentes en él se alinean, al igual como ocurre en el recocido térmico, y esto sucede cuando se aplica una energía al material. La pieza de trabajo no diferencia si la energía necesaria para producir el alivio viene desde un recocido térmico o algún método mecánico, como las vibraciones. La energía se acumula y causa un incremento infinitesimal de la temperatura, necesaria para provocar el movimiento y reubicación de las dislocaciones y llevar la pieza a un nivel más bajo de esfuerzos.

En cuanto a la frecuencia de vibración, se presenta un intervalo desde 0 a 100 Hz como el más utilizado, aunque se aclara que el valor depende del material, tamaño

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

y forma de la pieza a tratar. Además, en piezas soldadas se ha encontrado la mayor efectividad del tratamiento.

Según Rodero [8], existen dos métodos disponibles en el mercado para realizar el alivio de tensiones, los cuales son bastante similares en cuanto a equipamiento y procedimiento, diferenciándose el uno del otro por las frecuencias de trabajo a aplicar. El procedimiento consiste en hacer vibrar la pieza de trabajo desde frecuencia cero a una máxima (de 0 a 100 [Hz] por ejemplo) durante 8 minutos, haciendo un barrido que abarque todo el volumen, si es una pieza muy grande, o solo en una zona de la pieza si es pequeña. Luego se analizan las respuestas y se registran la o las frecuencias armónicas del sistema. Posteriormente, el primer método conocido como "Formula 62" perteneciente a la compañía Stress Relief Engineering [9], realiza otra serie de vibración a la frecuencia armónica más baja encontrada por 10 minutos y cambia a la siguiente frecuencia armónica encontrada cuando se cumple este periodo. Este procedimiento se repite de 2 a 3 veces, dependiendo de las frecuencias armónicas encontradas. El segundo método es llamado Sub-resonante y utiliza el mismo procedimiento, donde se realiza un barrido de 8 minutos por la pieza para encontrar las frecuencias armónicas, pero la diferencia radica en que las vibraciones siguientes se hacen a una frecuencia levemente inferior a las armónicas. Se habla de unos 4 Hz bajo dichas frecuencias de vibración, y cambia a la siguiente frecuencia armónica encontrada cuando la vibración se estabiliza, ya que esto es un indicador de que los EE. RR se han relajado. Esto debería ocurrir en un tiempo menor a 30 minutos. El método sub-resonante o sub-armónico esta patentado por Bonal Technologies Inc. Y llaman a esta técnica "Meta-Lax". [10]

La razón de la diferencia en los valores de frecuencia de vibración entre estos dos métodos se sustenta en que los creadores de la técnica sub-armónica (Meta-Lax) implementaron en sus talleres la Formula 62, pero encontraron que las piezas tratadas presentaban deformación plástica y efectos de fatiga (formación de grietas y microgrietas), por lo que propusieron utilizar frecuencias menores. La técnica sub-armónica se basa en dos principios, los cuales se citan a continuación [8]:

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

- La frecuencia óptima para el alivio de EE. RR. mediante la utilización de energía de vibración corresponde a la porción de frecuencia sub-armónica de la curva armónica.
- La frecuencia natural de una pieza o estructura que posee tensiones residuales se encuentra o localiza en una posición no natural o “falseada”. El fenómeno de desplazamiento de la curva que se produce como consecuencia de la reducción del nivel de esfuerzos puede ser aprovechado para examinar la efectividad del proceso de alivio de tensiones.

Para aclarar estos principios, en la Figura 10 se muestran las curvas de vibración de un material de muestra, donde la curva de color negro corresponde a la posición “falseada”, es decir, la pieza con las tensiones presentes y sin tratamiento. La curva de color rojo corresponde al pulso cuando se ha realizado la vibración para el alivio de esfuerzos, y la curva en azul, corresponde a una vibración extra, para demostrar que no cambia considerablemente, ósea, se estabiliza en su posición de vibración natural.

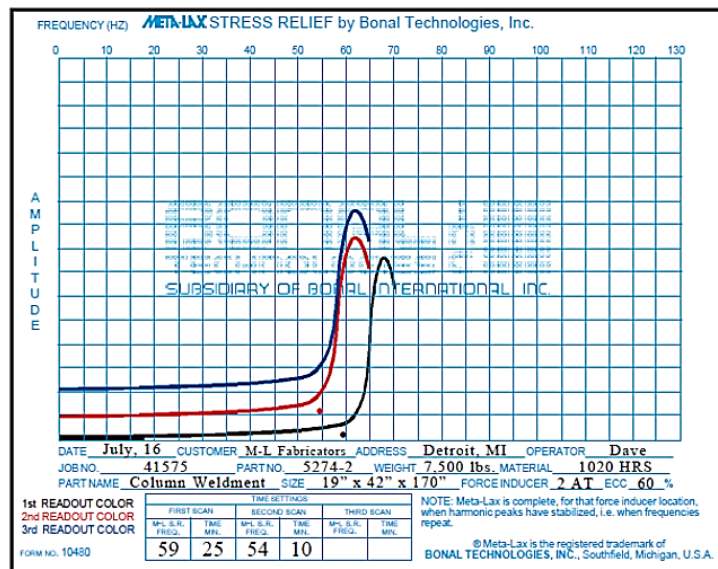


Figura 10. Curvas de vibraciones realizadas a un material, donde se muestra la diferencia entre un estado con EERR (negro) y un estado aliviado (roja y azul). [10]

Una investigación sobre el VSR en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Strathclyde, Glasgow, Escocia, [11], buscó aclarar algo más la teoría fenomenológica del proceso a través de experimentos realizados a una placa de un

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

acero EN3b (Ver Tabla 1), midiendo los EE. RR introducidos a la pieza por un proceso de laminado en frío y midiéndolos posteriormente, después de aplicar VSR

Tabla 1. Propiedades del acero EN3b y composición química.

	C	Si	Mn	Ni	S	P
%	0,25	0,35	1,0	--	0,06	0,06
Esfuerzo Máximo	450 [MPa]					
Esfuerzo de Fluencia Uniaxial	250 [MPa]					

Walker et al. [11], señalaron que los patrones de las tensiones residuales están, en general, en equilibrio sobre una estructura, es decir, los esfuerzos de tracción en algunas áreas están compensados por los esfuerzos de compresión en otros lugares. Ya sea obtenido por recocido térmico o por VSR, la reducción de esfuerzos implica el funcionamiento de mecanismos de deformación plástica, normalmente en forma de procesos micro-plásticos intragranulares a medida que los segmentos de dislocación individuales se desplazan a posiciones de menor energía, esto es, la ya mencionada alineación de dislocaciones.

Según Walker et al. [11], el VSR necesita de una teoría validada, con la intención de que esta técnica se aplique y utilice bajo un conocimiento fundamentado y no sobre la experiencia de la prueba y error. Es altamente probable que, si se sigue aplicando el método en base a la experiencia, su avance sea lento, además de que las piezas o componentes sean sub o sobre tratados, conduciendo a problemas irreparables como agrietamiento por fatiga y una inestabilidad dimensional. Por esto, para poder dar un grado satisfactorio de confianza al VSR, se postula un modelo estándar que explica el funcionamiento del VSR como la combinación de esfuerzos residuales y vibratorios que exceden la resistencia a la deformación del material. La presunción es que el flujo plástico subsiguiente es tal que cuando se elimina la amplitud vibratoria, el área previamente sometida a tensión puede ahora volver a un nivel bajo de EE RR. Por supuesto, esto implica que el VSR debería ser casi instantáneo, una vez que se alcanzó el nivel correcto de vibración.

En el experimento de Walker et al. [11], se laminaron barras rectangulares de acero EN3b en frío, ya que se consideró el proceso más estable para introducir EE RR en

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

una muestra. Luego, estas muestras se sujetaron y vibraron por un agitador electromagnético que fue accionado por un controlador. Éste mantuvo las condiciones de resonancia y proporcionó una medición precisa de las frecuencias de resonancia ($\sim 100 \pm 0,001$ Hz). Los efectos del tratamiento se caracterizaron por la medición directa del esfuerzo residual mediante una técnica de seccionamiento destructivo. Esta técnica fue desarrollada a partir del método de eliminación de capas. Un análisis detallado de los perfiles de líneas de difracción de rayos X proporcionó información relativa a la microestructura interna y la densidad de dislocación dentro de los materiales antes y después del tratamiento.

En la Figura 11, se presentan dos gráficos. El de la izquierda corresponde a la distribución de EE RR en las muestras laminadas desde la superficie hacia dentro del volumen. Se puede observar que todas las muestras, independiente del porcentaje de reducción que tengan, presentan los mayores esfuerzos en la superficie y los mayores valores aparecen con un menor porcentaje de reducción (1%). Para el experimento, se utilizaron las muestras con 1% de reducción para aplicar el VSR sobre ellas, debido a que la distribución de EE. RR. fue la esperada y la más estable (siempre decae a medida que la profundidad en la pieza aumenta).

Vale la pena mencionar que las tensiones residuales obtenidas en este estudio, en algunos casos, sobre pasan notoriamente el esfuerzo de fluencia del material, como es el caso de las muestras reducidas en el 1% de su sección. Con esto se abre un antecedente que apoya, en cierta medida, los resultados obtenidos en este estudio.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

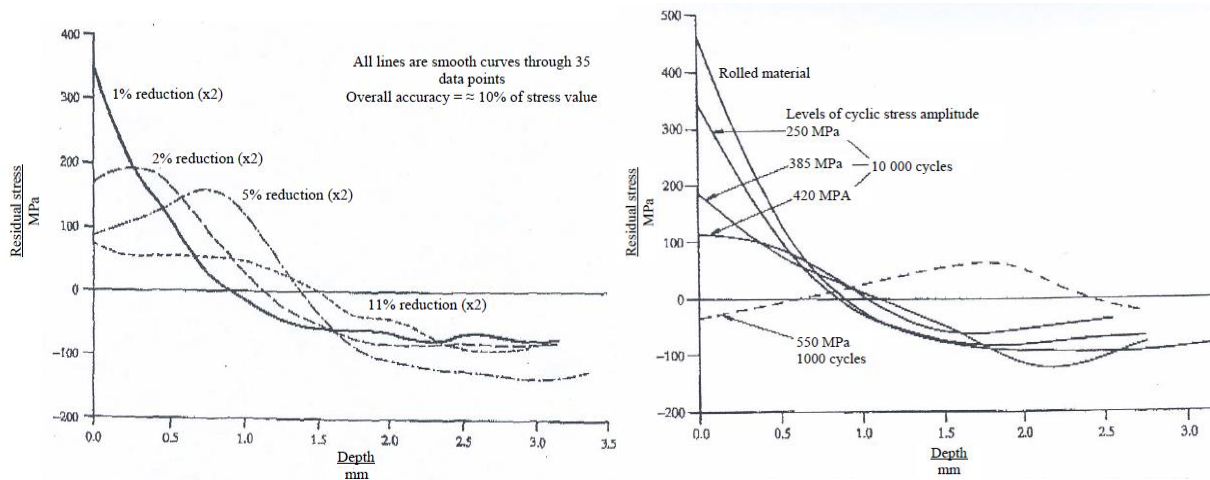


Figura 11. Gráficos de distribución de ER en las muestras de acero EN3b laminadas en frío a diferentes porcentajes de reducción (Izquierda) y distribución de ER para muestras con 1% de reducción en laminado con aplicación de VSR a diferentes cargas. [11]

En el gráfico del lado derecho de la Figura 11, se muestra la distribución de esfuerzos a diferentes muestras con un 1% de reducción por laminación en frío, y a diferentes cargas con la misma cantidad de ciclos. En esencia, los esfuerzos residuales superficiales después del tratamiento disminuyen con el aumento de la amplitud del esfuerzo y también con el número de ciclos aplicados. La dependencia de la duración del tratamiento es no lineal, haciéndose menor a medida que aumenta la amplitud del esfuerzo dinámico. La razón de esto es porque al aplicar esfuerzos del nivel de 385 y 420 [MPa], independientemente del número de ciclos, deforma la pieza, con las consecuencias de reducir las tensiones residuales a través de esta deformación.

Los niveles de tensiones superficiales tienden hacia un valor límite que depende de la amplitud del tratamiento. La velocidad de convergencia hacia este valor también se determina por la amplitud, por ejemplo, a 250 [MPa] la reducción de la tensión es esencialmente completa después de 10.000 ciclos. (Ver Figura 12)

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

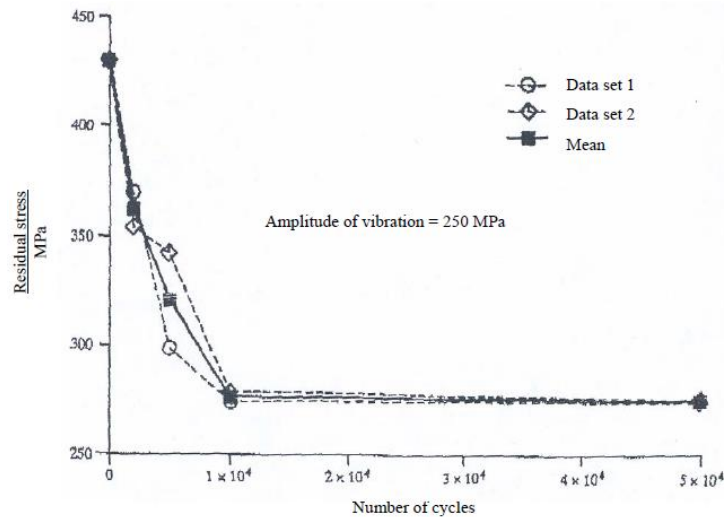


Figura 12. Efecto del número de ciclos con carga de 250 [MPa] sobre los ER.

Con amplitudes intermedias (<300 MPa), el alivio de tensión se limita a regiones cercanas a la superficie, donde los niveles de EE RR originales son más altos y las amplitudes de tensión más altas. A medida que las amplitudes aumentan más allá de estos niveles, los efectos del alivio del esfuerzo penetran más en el cuerpo del material. También se producen cambios en la forma del perfil de esfuerzo, reduciendo drásticamente el gradiente de esfuerzo cercano a la superficie. El aumento adicional de la amplitud del esfuerzo a 550 [MPa] da lugar a una deformación plástica masiva de la muestra de ensayo, acompañada de un alivio de tensión casi completo en todo el material. (Ver Figura 11, derecha)

Como conclusiones de estos experimentos, se plantea que el VSR es capaz de efectuar reducciones de hasta un 40% en magnitudes de EE RR. El nivel de esfuerzo aplicado necesario para producir tales efectos es relativamente bajo, donde un valor típico puede ser de 250 [MPa], que representa menos de la mitad de la resistencia máxima del material. A este nivel no se supera el límite de fatiga del material, de modo que se puede esperar que el tratamiento tenga un efecto despreciable sobre la vida de la fatiga. Efectos similares pueden ser inducidos por la carga no resonante, aunque se experimenta más dificultad para alcanzar la amplitud de tensión requerida. El número de ciclos de carga requeridos para el alivio máximo de tensión varía inversamente con la amplitud del esfuerzo dinámico, a 250 [MPa] el proceso continúa a una velocidad decreciente de hasta 10.000 ciclos.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Se ha acumulado una evidencia que sugiere que el mecanismo del alivio del esfuerzo es uno de movimiento de dislocación a escala microscópica. Por lo que la posibilidad del VSR que se acelera por temperatura moderadamente elevada (~400 K) debe ser seriamente considerado.

2.6. Métodos de medición de Esfuerzos Residuales.

Existen diferentes formas de medir los EE.RR. de un material. A continuación, se describirán las más usadas y conocidas.

2.6.1. Difracción de Rayos X

Esta técnica es utilizada para medir esfuerzos residuales superficiales, por lo que se considera una técnica no destructiva, sin embargo, si se quiere medir más allá de la superficie, es necesario realizar pulidos (o electro-pulidos) y en ocasiones, cortar una pieza para que el volumen quepa dentro del equipo de DRX, en estas circunstancias se considera destructivo o semi-destructivo.

La medición se realiza exponiendo la pieza a rayos X producidos por la rápida desaceleración de electrones. Cuando un cristal del material de estudio es impactado por un rayo X a cualquier ángulo θ , una porción del rayo es dispersada por la red de átomos superficiales, mientras que la otra parte penetra a la segunda capa de átomos. En esta segunda capa ocurre el mismo fenómeno, es decir, una porción es dispersada y otra atraviesa a la siguiente capa. El efecto acumulativo de esta dispersión en los diferentes centros de dispersión del cristal, que están regularmente espaciados, es conocido como la difracción del haz de rayos X.

La DRX es una técnica de medición indirecta, ya que lo que realmente se está midiendo es la distancia interplanar relativa entre los planos cristalinos del material, que es comparada con los estándares conocidos para cada estructura cristalina. La deformación causada por los EE. RR. provoca cambios en el espaciamiento reticular comparado con el espaciamiento libre de cargas o esfuerzos, y a este cambio se le atribuye una magnitud del esfuerzo aplicado. En concreto, cuando se utiliza el método DRX, la posición del pulso de difracción cambiará a medida que se gire la muestra (Ver Figura 13). La sensibilidad del cambio está relacionada con el nivel de

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

esfuerzo presente en la muestra. Por lo tanto, si no hay esfuerzos residuales presentes en una muestra, no habrá cambio en la posición del pulso. [12]

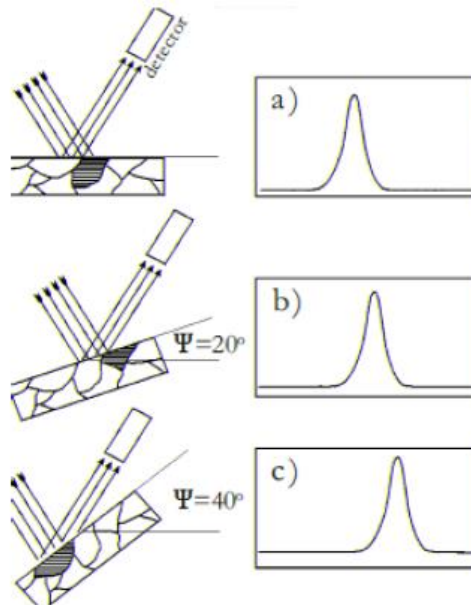


Figura 13. Corrimiento del pulso de la difracción a medida que cambia el ángulo de refracción.

Algunas de las restricciones que se tienen por este método son que, como se mencionó en un comienzo, la medición se limita a esfuerzos superficiales de la muestra y para obtener datos a más profundidad es necesario remover capas de material. Al remover capas se liberan esfuerzos que no se medirán, por lo tanto, las mediciones a mayor profundidad que los esfuerzos superficiales, pueden verse alteradas o “falseadas” por efecto del pulido. En esta misma línea, la DRX considera una condición de esfuerzo planar, esto es, esfuerzos en componentes X e Y, mientras que asume que no existen esfuerzos (ni deformación) perpendiculares a la superficie. Esta suposición no es real, ya que una componente de deformación perpendicular existe como consecuencia del módulo de Poisson. [2]

2.6.2. Ultrasonido

Este método de medición se basa en las propiedades de propagación de la onda ultrasónica a través de un sólido. Existe evidencia científica que la velocidad de propagación de la onda varía según el tipo de material y sus características de carga. Las ondas acústicas que pueden propagarse en un medio isotrópico son las

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

ondas longitudinales y transversales. Las ondas longitudinales son una perturbación ocasionada por una tensión normal, donde el desplazamiento de las partículas del material ocurre en la misma dirección de propagación de la perturbación. Mientras que las ondas transversales son ocasionadas por tensiones de cizallamiento y el desplazamiento de las partículas ocurre en el plano perpendicular a la propagación.

Mediante el análisis de las ondas ultrasónicas es posible determinar el comportamiento elástico de los materiales isotrópicos, a través de la medición de la velocidad de propagación de las ondas. Donde las ondas longitudinales presentan una velocidad de propagación de aproximadamente la mitad de la generada por una onda transversal.

La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas puede variar dentro de un rango muy estrecho a consecuencias de factores ambientales como la temperatura o por factores internos del material; entre los cuales podemos mencionar a los esfuerzos residuales o tipo de microestructura. [13]

La técnica de ultrasonido, para la medición de esfuerzos residuales, se basa en el efecto acústico elástico, ya que, la velocidad de propagación de la onda elástica a través de un sólido depende directamente de los esfuerzos mecánicos. Por lo que cualquier cambio en la constante elástica por efecto de un esfuerzo aplicado o residual, se manifiesta en la variación de la velocidad de propagación de la onda. El método empleado para medir la velocidad de la onda ultrasónica se basa en la medición del tiempo de vuelo o en la medición de la frecuencia. Debido a que con la variación del estado de esfuerzos, el espesor del material también varía y entonces la longitud de la trayectoria de la onda se modificará. [13]

En la Figura 14 se puede observar la relación entre los cambios de velocidad de onda longitudinales y ortogonales bajo la acción de cargas externas de tracción y compresión en dos distintos aceros y una aleación de aluminio. [2]

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

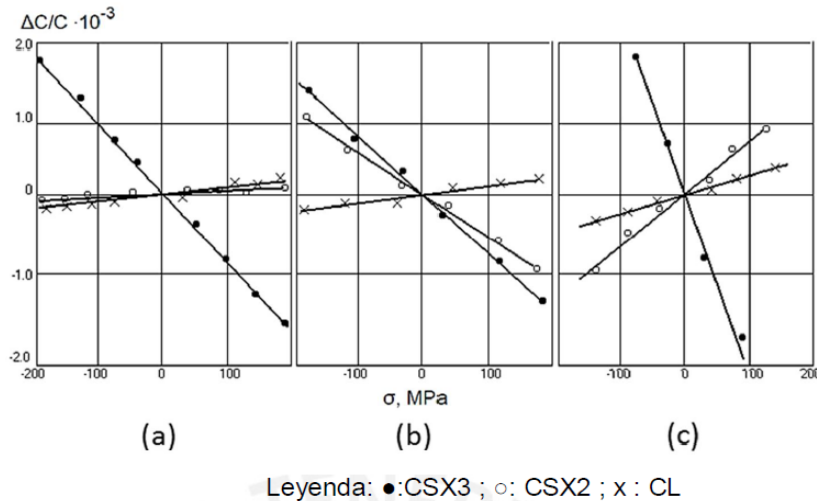


Figura 14. Cambios en la velocidad de onda ultrasónica longitudinal (CL) y ondas de corte de polarización ortogonal (CSX3; CSX2) en función de tensión mecánica en (a) Acero A; (b) Acero B; y (c) Aleación de Aluminio. [2]

Una de las principales desventajas de este método, es que es necesario determinar de forma exacta la distancia y tiempos del recorrido de las ondas ultrasónicas, cosa bastante compleja de medir en la mayoría de los casos. Por esta razón, se están realizando estudios para aumentar la precisión de estas mediciones con ondas ultrasónicas, por ahora, esta técnica se sigue desarrollando.

2.6.3. Método del Agujero Ciego.

Esta técnica de medición semi-destructiva, considerada casi no destructiva, por el daño mínimo que causa la perforación, que es del orden de un par de milímetros de diámetro, consiste en medir las microdeformaciones generadas por los EE. RR. que son relajados por efecto de una perforación. Se deben pegar rosetas que contienen de 3 a 6 galgas extensométricas y realizar una perforación controlada en el centro geométrico de las estampillas, de varios pasos o avances hasta llegar a una profundidad determinada.

El efecto de la perforación en el material genera una relajación de los esfuerzos en el contorno del agujero que hace posible medir por medio de las galgas las microdeformaciones resultantes de los esfuerzos. Vishay Precision Group, fabricante de rosetas para la medición de EE. RR. publica una serie de notas técnicas sobre este

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

tema, y en particular, en la nota técnica TN-503 [14], señala seis pasos importantes y generales de la medición en sí; estos son:

- Se instala una roseta con galgas extensométricas de tres (o seis) elementos, como las que se muestran en la Figura 15, en el punto donde se desean medir los EE. RR.
- Cada canal de la roseta se conecta a un indicador de tensión estática multicanal, que corresponde al medidor, como el Micro-Measurements Model P3 (medidor de tres elementos), o el Sistema 5000 (medidor de seis elementos).
- Una herramienta de perforación (Modelo RS-200 u otro equipamiento) se acopla a la zona de prueba y se centra sobre un objetivo en el centro geométrico de la roseta.
- Después de equilibrar a cero los circuitos del medidor, se perfora un agujero pequeño y poco profundo a través de una secuencia de pasos de avance sobre el centro geométrico de la roseta.
- Las lecturas se toman midiendo las deformaciones relajadas en cada avance, que corresponden al esfuerzo residual en cada paso.
- Utilizando relaciones especiales de reducción de datos, los esfuerzos residuales principales y su orientación angular, se calculan a partir de las deformaciones medidas.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

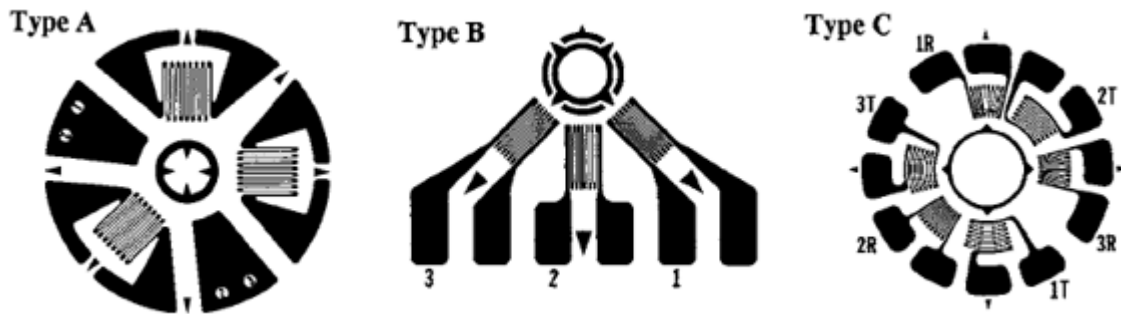


Figura 15. Rosetas de tres tipos. Con 3 galgas (Tipo A y B) y con 6 galgas (Tipo C).

Vishay [14], añade que el procedimiento anterior es relativamente simple y se ha estandarizado en la Norma ASTM E-837. Con el uso de equipos y suministros disponibles en el mercado e incluso sustituyendo algunos de los señalados, y siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM, cualquier técnico calificado puede aplicar el método de perforación de agujeros de manera rutinaria, ya que no se requiere experiencia especial para realizar las mediciones. El método también es muy versátil y puede realizarse tanto en el laboratorio como en el campo (con los equipos idóneos), en objetos de prueba que varían ampliamente en tamaño y forma. El orificio pequeño no afectará significativamente la integridad estructural de la parte que se está probando (el orificio puede ser de 0.8 a 4.8 mm de diámetro y profundidad), por esto la calificación de ensayo semidestructivo. Con objetos de prueba grandes, a veces es factible quitar el orificio después de que se complete la prueba, utilizando herramientas como esmeriles pequeños. Esto debe hacerse con mucho cuidado, por supuesto, para evitar la introducción de EE. RR. o provocar una zona concentradora de esfuerzos.

Las desventajas más significativas de este método son la sensibilidad que posee frente a errores de medición, como pueden ser la precisión en el centrado de la perforación, vibraciones en la perforación, deformación plástica en el contorno interior de la perforación, superficies paralelas entre el material de prueba y el equipo perforador, precisión de conexión eléctrica entre la roseta y el medidor de deformaciones (P3) y la recopilación y transformación de datos de microdeformación a niveles de esfuerzo. Sin embargo, todos estos problemas son

rápidamente superables y evitables mientras se mantenga un procedimiento correcto y aislación de cualquier anomalía en las mediciones.

2.7. Simulación de Esfuerzos Residuales

La simulación de un proceso, cual quiera sea este, es de gran ayuda para obtener una aproximación de ciertos valores de parámetros dominantes en dicho proceso. Esta aproximación siempre está sujeta a diferentes suposiciones o ideales que a veces, no reflejan la realidad tal y como es. La predicción del nivel de EE. RR producidos por un proceso de soldadura no queda exenta de esta característica de las simulaciones. R. Bustamante [3], simuló, entre otras cosas, el nivel de tensiones residuales de placas de acero ASTM A36, mismo acero utilizado en este trabajo, después de aplicar un proceso de soldadura.

La modelación de R. Bustamante [3], se formuló en dos partes, una corresponde al cálculo de los campos de temperatura y posterior a esto, la determinación de los esfuerzos residuales utilizando los campos de temperatura anteriormente simulados. El método numérico utilizado fue el de elementos finitos para problemas no lineales (altas deformaciones), elasto-plásticos, usando como suposición básica el esquema desacoplado para la solución del problema de esfuerzos térmicos, es decir el problema termoelástico se divide en dos partes, primero el cálculo de las temperaturas, y posteriormente el de esfuerzos. Se utilizó el programa ABAQUS (version 5.8), en una estación Hewlett Packard C 200 del Departamento de Mecánica de la Universidad.

Las placas estudiadas, corresponden a tres distintos espesores de 0,25; 0,5 y 1 pulgada, y de 10 x 12 pulgadas de ancho y largo, respectivamente. El modelo utilizado tiene dos características importantes que se mencionan a continuación, para velocidad de pasada y temperatura inicial [3]:

- Para distintas velocidades de pasada: La velocidad de pasada, influye en el calor de aporte entregado por el electrodo; a menor velocidad, mayor es el calor entregado y por tanto mayores son las temperaturas alcanzadas, debido al mayor tiempo de "permanencia" del electrodo en cada sección de

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

la placa. Las velocidades utilizadas fueron: 6 [mm/s]; 8 [mm/s]; 10 [mm/s] y 12 [mm/s].

- Para cada una de estas velocidades, los calores de aporte son de 937,8; 703,2; 563,1 y 468,8 [J/mm].
- Para distintas temperaturas iniciales de la placa: La temperatura inicial de la placa es uno de los factores que influyen en la magnitud de los esfuerzos residuales; un "precalentamiento" de la misma es sindicado como uno de los métodos para disminuir los esfuerzos residuales. Las distintas temperaturas iniciales utilizadas fueron: 70 [°F] (ambiental), 212 [°F], 302 [°F] y 392 [°F].

Los resultados de la simulación se muestran a continuación

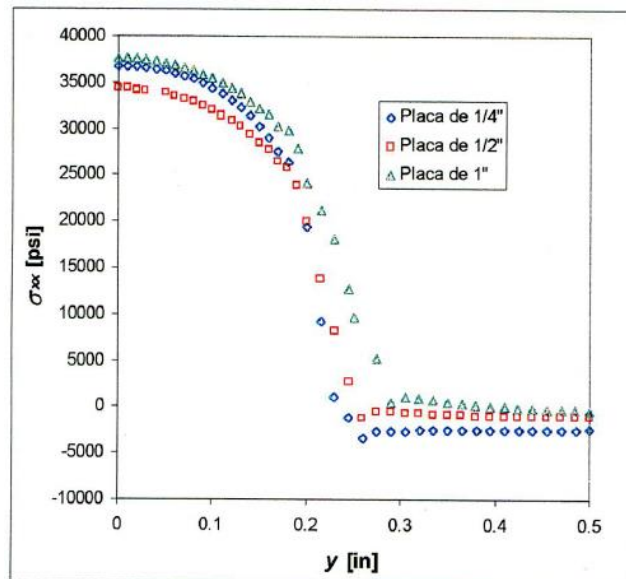


Figura 16. Efecto del espesor en la generación de esfuerzos residuales. $V = 6$ [mm/s] y temperatura inicial de 70[°F].

Los resultados presentados en la Figura 16 concuerdan con la teoría y son bastante coherentes, en cuanto mientras más espesor tenga una plancha, mayor será la resistencia que esta opondrá a la deformación, por lo que tendrá mayor capacidad de generación de esfuerzos. Así mismo en la Figura 17, a mayor gradiente térmico, mayor será el esfuerzo térmico asociado, y por consiguiente mayores serán los esfuerzos que se generan, por lo tanto, a mayor temperatura de pre-calentamiento, menor serán los esfuerzos residuales.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

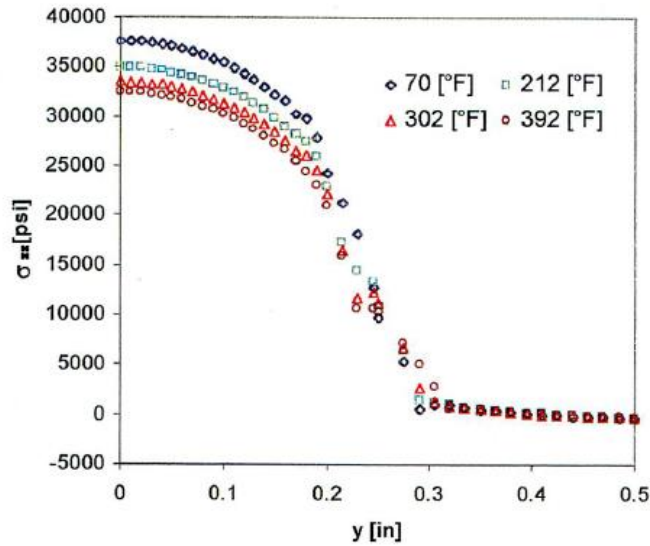


Figura 17. Esfuerzos para la placa de 1 [in] a diferentes temperaturas iniciales.

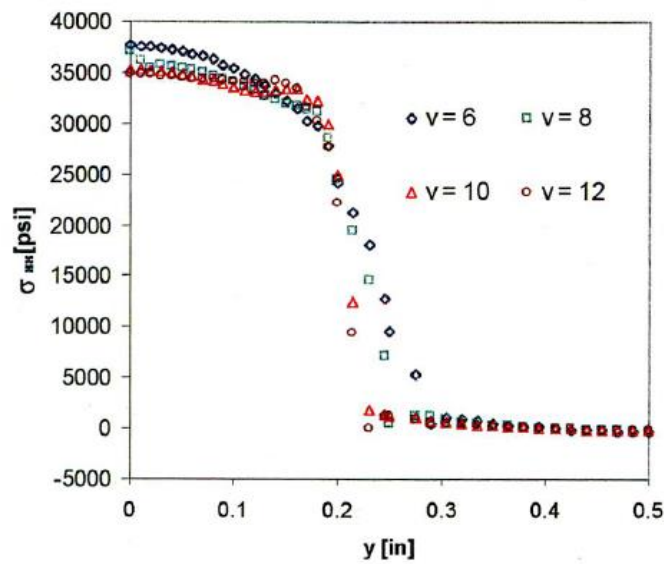


Figura 18. Esfuerzos para placa de 1 [in] a diferentes velocidades de pasada.

Finalmente, en la Figura 18, si bien la diferencia no es tan notoria gráficamente, si existe una tendencia en coherencia con los resultados de las figuras anteriores, ya que la velocidad de pasada, es inversamente proporcional al calor de aporte a la soldadura, por lo que a mayor velocidad, se alcanzarán temperaturas más bajas cerca del cordón, y viceversa, mientras más lento sea aplicado el proceso de soldadura, habrán mayores temperaturas, aumentando el gradiente térmico y por consiguiente, aumentando el esfuerzo térmico.

3. Desarrollo Experimental

3.1. Caracterización de Cupones

El metal estudiado, corresponde a un acero fabricado bajo la norma ASTM A-36, de dimensiones 250 x 250 x 25 milímetros aproximadamente, que corresponden a despuntes de cortes de planchas del mismo espesor (25 [mm]) que se utilizan en ECASO para fabricar vigas de harneros para minería. Se seleccionaron 9 placas y se les aplicó un granallado de limpieza antes de depositar el cordón de soldadura.

Se realizó una caracterización metalográfica del metal base previo a cualquier prueba y aplicación de algún proceso. Posterior a las mediciones de EE. RR. se realizó una caracterización de la zona del cordón depositado en los cupones, también con metalografías y mediciones de dureza a diferentes distancias del centro del cordón. Además, se realizaron ensayos de tracción para comprobar el valor del esfuerzo de fluencia del material, esto último debido a que la norma de fabricación del A-36 solo entrega un valor mínimo de 36 [ksi] ó 260 [MPa] aproximadamente.

Tabla 2. Composición química obtenida de análisis químico y rangos de la norma ASTM A36.

Ítem	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cu
Muestra	0,168	0,190	0,965	0,034	0,022	0,005
ASTM A36	<0,26	<0,4	0,8-1,2	<0,04	<0,05	<0,2

El acero A-36, es un acero con aplicaciones estructurales, principalmente, soldable sin mayores cuidados. En la Tabla 2 se pueden ver los resultados del análisis químico realizado a través de espectrometría de emisión óptica, en la empresa Metalam S.A, que comprueban que el metal está dentro de los rangos de la norma para clasificarlo como un acero A-36.

Las metalografías del metal base arrojaron resultados esperados. Se observan microestructuras correspondientes a un acero de bajo carbono y baja aleación, donde los granos corresponden a la fase Ferrita del diagrama de fases del Fe-C, junto con colonias de Perlita. Estas últimas identificables por su color más oscuro

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

dado por la gran cantidad de interfase ferrita-cementita, y a mayores aumentos se logra ver la microestructura laminar característica de éste micro-constituyente. En la Figura 19 se aprecian dos metalografías, una a 100X y la otra a 200X, donde se observa una distribución uniforme de las fases, con una razón en volumen cercana a 1:3, entre la perlita (oscura) y la ferrita (clara) respectivamente, no se ve una orientación notoria de los granos, por lo que no es posible tener un indicio sobre la dirección de laminación.

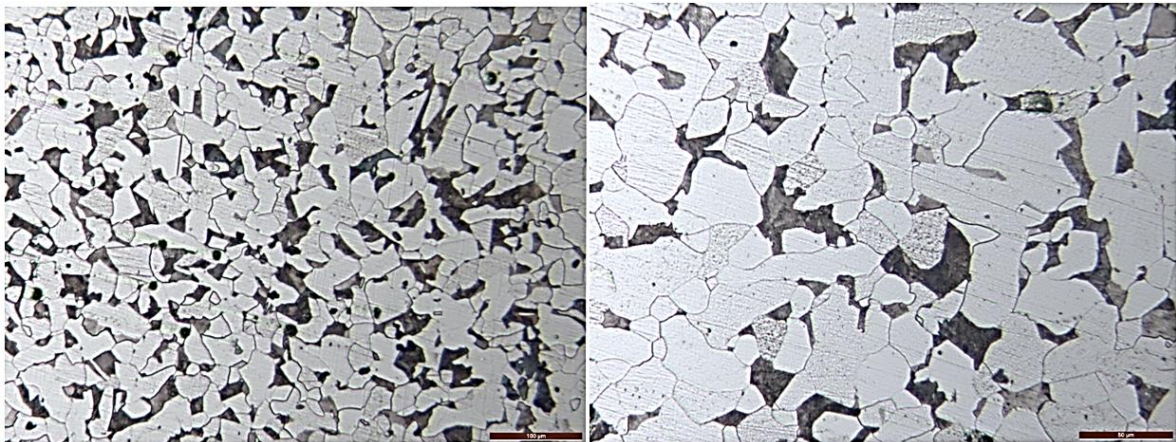


Figura 19. Metalografías a 100X (izquierda) y a 200X (derecha).

Al realizar otra preparación metalográfica, esta vez desde la sección longitudinal, se logra ver una orientación de los granos y fases antes descritas, debido a la laminación que sufrieron estas placas en su proceso de fabricación. Con la Figura 20 se descubre claramente la dirección de laminación. Al igual que en la serie de imágenes anterior, se ve una distribución de las fases bastante uniforme y la razón entre estas se mantiene.

Este material sobre el cual se trabajó y se realizaron todos los tratamientos de alivio de tensiones, es un acero laminado en caliente y con un tratamiento de normalizado. Todos los cupones, desde el 1 al 7 están fabricados con este mismo acero.

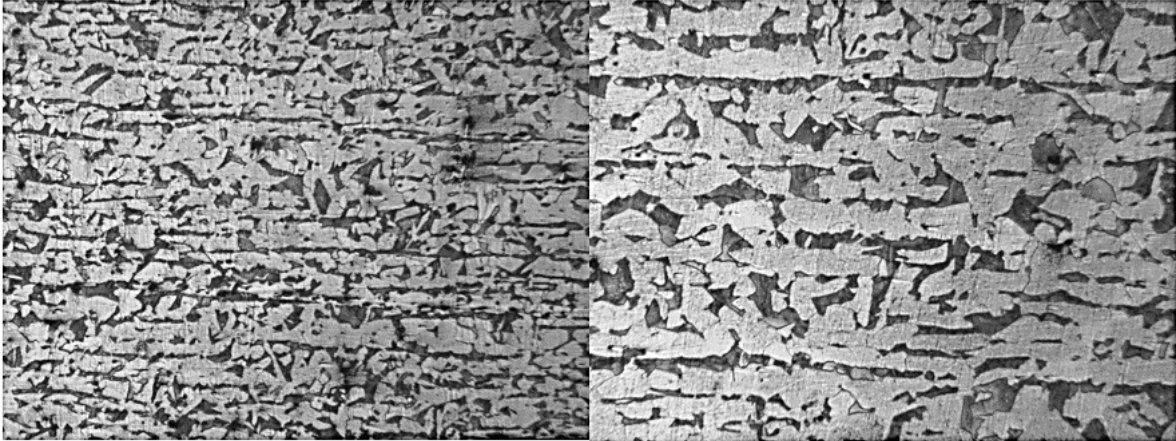


Figura 20. Metalografías desde sección longitudinal, para descubrir el bandeo, a 50X (izquierda) y 100X (derecha).

3.2. Generación de Esfuerzos Residuales

Para cumplir con el objetivo de probar el método de alivio de EE. RR. es necesario tener un material que posea tales características, y la forma en que se generaron es a través de la depositación de un cordón de soldadura en el centro de las placas. El proceso de soldadura seleccionado fue arco sumergido (SAW). Con esto se limitó el factor humano en el experimento por ser un proceso semi-automático, donde el operario se restringió a posicionar los rieles y el carro que contenía la torcha en la posición adecuada y fijar variables de soldadura como el voltaje, amperaje y velocidad de pasada, además de asegurar un correcto esparcimiento del fundente desde la tolva hacia el arco eléctrico. Con esto, variables como la calificación del soldador, su destreza y la velocidad con que aplica el cordón fueron acotadas a lo hecho por el carro móvil que contenía la torcha del proceso SAW.

En la Figura 21 se observa el carro mencionado anteriormente, donde se muestran las principales partes del equipo. La zona señalada con el número 1, corresponde a una guía de posición, que se utiliza para visualizar por donde pasará el arco eléctrico. El arco se encuentra en la posición número 2, que corresponde a la antorcha SAW. Esta torcha posee dos salidas, el fundente, encargado de proteger de la oxidación a la poza de metal fundido y al cordón a alta temperatura y la otra salida es la del material de aporte, proveniente del carrete (número 3). El pequeño montículo que se ve debajo de la antorcha corresponde al fundente, que siempre

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

cae en exceso y posteriormente es recuperado para su reutilización. El arco eléctrico está bajo el fundente, oculto en la arena, por esto el nombre de “Arco Sumergido”.



Figura 21. Partes del carro móvil que contiene la antorcha de SAW. (1) Guía de posición. (2) Torcha y descarga de fundente. (3) Carrete de material de aporte/electrodo. (4) Tolva de fundente. (5) Rueda y riel. (6) Pieza soldada.

El fundente es alimentado al proceso desde una tolva, señalada por el número 4 que, en ocasiones, si el cordón es muy extenso, se debe rellenar para evitar la exposición del arco a la atmosfera libre. La alimentación es a través de la manguera blanca que une la tolva con la torcha. Todo este proceso ocurre mientras el carro completo se desliza a través del riel, señalado con el número 5. Finalmente, el número 6 indica la pieza que está siendo sometida al proceso de soldadura.

El cordón de arco sumergido se depositó posicionando 9 placas en forma consecutiva, unidas en 4 puntos soldados (puntos de soldadura), donde 2 de estos

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

puntos están soldadas a una viga con el fin de nivelar una superficie para ubicar los rieles donde avanza el carro SAW, y los 2 puntos restantes en el costado entre placas.



Figura 22. Fotografías del carro SAW en funcionamiento, depositando cordón de soldadura sobre placas en estudio.

Luego de posicionar las placas, se hizo correr el carro guiado por una línea anteriormente marcada, por el centro de las placas, comenzando el cordón a la mitad de la primera de las 9 placas (placa 0) y terminando después de sobrepasar el límite de la placa número 7, correspondiente a una porción de la placa 8. En la Figura 22 se puede visualizar lo descrito anteriormente, donde se encuentran posicionados los rieles y el carro está en funcionamiento.

De esta forma las placas 0 y 8 se descartan y las mediciones posteriores se realizaron sobre las placas de la 1 a la 7. Este procedimiento asegura obtener condiciones idénticas en las 7 placas utilizadas, ya que el cordón de soldadura se depositó en las mismas condiciones para todas, y las variaciones en las condiciones de voltaje o corriente son debidas a la variación propia de la red eléctrica de

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

cualquier instalación. En la Figura 23 se puede observar las placas, de la 1 a la 7, ordenadas.



Figura 23. Resultado del proceso SAW, con las placas ya separadas, pero ordenadas en forma creciente.

Los parámetros del proceso SAW más relevantes se muestran en la Tabla 3. Los valores de voltaje y amperaje fueron recomendados por los operarios del taller de maestranza de ECASO, corresponden a los valores más altos a los que hubiesen aplicado el proceso SAW, por lo tanto, las placas deberían tener una alta generación de esfuerzos térmicos y por consecuencia, un elevado nivel de EE. RR.

La velocidad de pasada está en el rango bajo lo común para un proceso de este tipo, y aunque es un parámetro muy relevante, no merece un mayor análisis más que mencionar su constancia durante toda la aplicación del cordón, gracias al control ingresado al comienzo del proceso.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 3. Parámetros del proceso SAW aplicado a las placas en estudio.

Variable	Velocidad de Avance	Corriente	Voltaje	Fundente	Metal de Aporte
Valor/Nombre	4	400	30	K205	EM-12K
Unidad/Proveedor	mm/s	Amperes	Volt	Indura	Indura

Con estos parámetros del proceso, el calor de aporte para el depósito del cordón sobre los cupones fue de 2850 [J/mm], esto, teniendo en cuenta una eficiencia para el arco sumergido del 95% [15], una de las más altas entre todos los procesos de soldadura al arco. Estas consideraciones, más el hecho de no existir un precalentamiento del material soldado, hace que las condiciones sean ideales para la generación de EE. RR. por el alto nivel de esfuerzos térmicos.

El fundente y el metal de aporte son parámetros fijos, proporcionados por la empresa. El fundente K 205 Indura, es un fundente neutro para uno o varios pases, se puede utilizar con corriente continua o alterna, su acondicionamiento no es necesario si es la primera utilización (si no, se recomienda calentar por una hora a 250 [°C] para quitar humedad), posee una excelente apariencia visual del cordón y una fácil remoción de la escoria, además de una buena resistencia al impacto a baja temperatura.

En tanto, el metal de aporte EM 12K, también de Indura, es un alambre de acero medio manganeso, recomendado para uniones a tope y filete en aceros de medio carbono y baja aleación, se debe utilizar con corriente continua y electrodo positivo. El alambre posee una delgada capa de cobre que mejora la conductividad con la boquilla de la antorcha, esto hace que el arco eléctrico sea mucho más estable y la vida de la boquilla aumente.

3.3. Tratamiento de Cupones

El tratamiento de cada cupón fue diseñado para que, en conjunto, se pudiesen obtener la mayor cantidad de conclusiones con respecto al método de vibraciones.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Se necesitó un caso inicial o base, para ser comparado con todos los cupones tratados. El cupón base fue el número 3. A este no se le aplicó ningún tratamiento de alivio de esfuerzos y solo se preparó, al igual que todo el resto, superficialmente para la medición por medio de la norma ASTM E 837.

Los cupones 4 y 5 fueron tratados térmicamente, con el tratamiento de recocido aplicado por ECASO a las vigas de harneros (fabricadas con el mismo material y espesor de los cupones). El resto de los cupones, es decir, los números 1, 2, 6 y 7 fueron tratados con vibraciones, aplicadas con una mesa vibratoria del departamento de Obras Civiles, del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO), en dependencias de la Universidad Técnica Federico Santa María.

En la Tabla 4 se puede ver un resumen con mayores detalles del tratamiento y sus parámetros que recibió cada cupón antes de ser perforados para la medición de EE. RR.

Tabla 4. Resumen de tratamientos aplicados a cada cupón.

Cupón	Tipo Tratamiento	Tiempo	Temperatura	Voltaje [V]	Lugar
1	Vibracional	30 [min]	18 [°C]	100	USM
2	Vibracional	10 [min]	18 [°C]	100	USM
3	Ninguno	-	-	-	-
4	Térmico	8 [h]*	Hasta 600 [°C]	-	ECASO
5	Térmico	8 [h]*	Hasta 600 [°C]	-	ECASO
6	Vibracional	10 [min]	18 [°C]	200	USM
7	Vibracional	30 [min]	18 [°C]	200	USM

*Tiempo total aproximado de tratamiento.

El tratamiento de cada cupón fue elegido al azar. Todos los cupones están fabricados bajo las mismas condiciones y en el mismo proceso de soldadura SAW, por lo que, teóricamente, no existen diferencias significativas entre todos los cupones.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

3.3.1. Tratamientos Térmicos

El tratamiento de recocido realizado por ECASO, se llevó a cabo en un horno de, aproximadamente, 25 [m³] de capacidad, que posee 4 quemadores Diesel Lamborghini (3 en funcionamiento) en la parte inferior del horno. El recocido se realizó junto a otras piezas fabricadas en la maestranza, específicamente, junto a 5 vigas de harneros. En la Figura 24 se observa el horno de tratamiento térmico con los tres quemadores en funcionamiento, la puerta frontal abierta, y todas las paredes, exceptuando el piso, cubierto de lana mineral. En el centro del horno hay un riel por donde se hace correr un carro con la carga que se desea tratar, haciendo más fácil el proceso de carga del horno. El control de temperatura es capaz de establecer una temperatura, modificarla en un periodo de tiempo definido y apagar los quemadores según requiera el tratamiento térmico.



Figura 24. Horno de tratamiento térmico de fabricación propia en ECASO. 4 de sus 3 quemadores en funcionamiento.

Como se mencionó en la Tabla 4, los cupones 4 y 5 fueron tratados térmicamente. El recocido aplicado a estas placas consistió en subir la temperatura a una tasa de 100 [°C/h] hasta alcanzar los 600 [°C] manteniendo esta temperatura por una hora.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Posterior a esto, el enfriamiento fue dentro del horno, de manera que fuese lento, y así evitar la generación de esfuerzos térmicos.

3.3.2. Tratamiento Vibracional

Las vibraciones se aplicaron en dependencias del departamento de Obras Civiles, en el LEMCO. En este laboratorio se encuentra una mesa vibradora utilizada para realizar ensayos de densidad en diferentes tipos de suelo. El equipo vibratorio consiste en una plataforma empotrada en un dado de concreto en cuatro puntos, uno por cada esquina de la plataforma cuadrada. El dado de concreto a su vez se encuentra aislado del suelo. Las vibraciones del sistema son provocadas por un motor de masa excéntrica que está anclado a la superficie inferior de la plataforma. Todo este sistema se encuentra dentro de una pieza aislada acústicamente, para evitar una exposición prolongada de los trabajadores del LEMCO a los ruidos producidos por las vibraciones.

El control de la mesa se encuentra en el exterior de la pieza, donde hay un variador de voltaje, que permite variar la tensión eléctrica del motor haciendo variar la velocidad con que gira y, por lo tanto, modificando la amplitud de la vibración generada.

Antes de realizar las vibraciones a los cupones 1, 2, 6 y 7, se realizó un barrido a diferentes voltajes de una placa con las mismas dimensiones y el mismo material, pero que solo se utilizó para encontrar las diferentes amplitudes posibles de alcanzar con la mesa vibradora. Este experimento se realizó partiendo desde 50 [V] hasta alcanzar 220 [V], que correspondía al máximo admisible por el motor, pasando por 100, 150 y 200 [V].

En la Figura 25 se puede observar la mesa vibratoria. Sobre ella se posiciona la placa con la que se realizó el barrido, más el equipo utilizado para la medición de la vibración. En la imagen, no se logra ver el motor de masa excéntrica, pero este se encuentra ubicado justo debajo del sensor de vibración (caja roja), anclado a la superficie inferior de la mesa.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

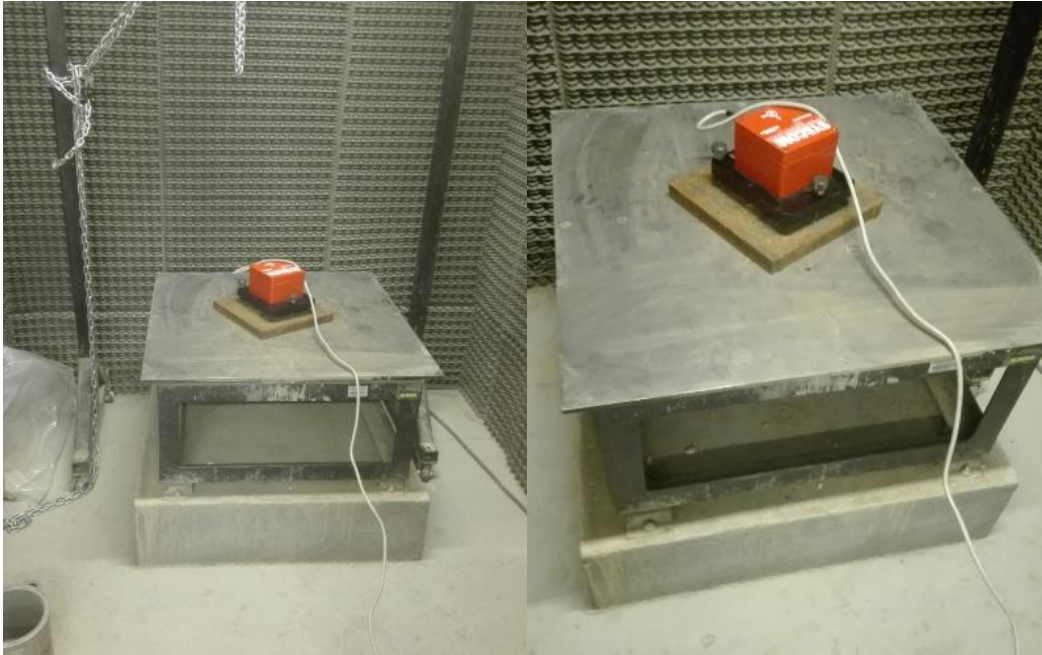


Figura 25. Mesa vibradora junto a la placa de prueba y sistema de medición de vibraciones (caja roja).

El sistema de medición SYSCOM, mide el desplazamiento en el espacio y con los datos que entrega, es posible calcular la frecuencia de vibración y parámetros comparativos del valor de la amplitud. Las mediciones del barrido se hicieron mediante vibraciones de entre 3 a 5 minutos. El equipo comienza a guardar datos y necesita un periodo de 1 minuto como mínimo para obtener los datos de un ciclo de vibración. El barrido a diferentes voltajes arrojó la existencia de dos niveles de amplitud de vibración, uno alto y uno bajo, donde cada nivel se marcó notoriamente a los 200 [V] (alto) y el otro a 100 [V] (bajo).

Con estos datos entregados por el barrido, fue posible diseñar y planificar 4 diferentes tipos de tratamientos, manejando variables de amplitud de vibración controladas a través del voltaje de la mesa vibratoria y el tiempo de vibración o tiempo de tratamiento. Las pruebas se pensaron para poder concluir qué variable y/o combinación de ellas logra el mejor resultado para reducir el nivel de EE. RR. En resumen, se realizaron dos vibraciones a 100 [V] con un tiempo de 10 y 30 [min], y dos vibraciones a 200 [V] con tiempos de 10 y 30 [min]. Esto permite evaluar ambas variables en un nivel bajo y alto y todas sus posibles combinaciones.

3.4. Caracterización de la Unión Soldada.

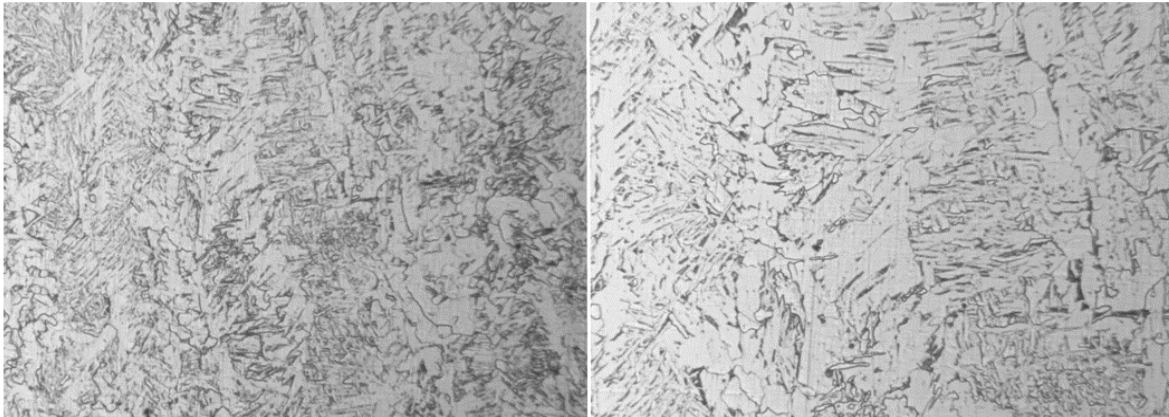


Figura 26. Cordón de soldadura a 50x (a la izquierda) y a 100x (a la derecha).

La microestructura presente en el cordón, mostradas desde la Figura 26 a la Figura 28, se asemeja a la típica para estos casos. Existe una zona bastante homogénea, con una estructura ferrítica acicular (ver Figura 26) que corresponde a la estructura de solidificación de un acero de bajo carbono. El límite de la zona solidificada entra en contacto con el área de mayor tamaño de grano de toda la zona afectada térmicamente (ZAT) (Figura 27). Acá se observa ferrita acicular formada en los bordes de grano previamente austeníticos, particular en los enfriamientos rápidos, típicos de las soldaduras.

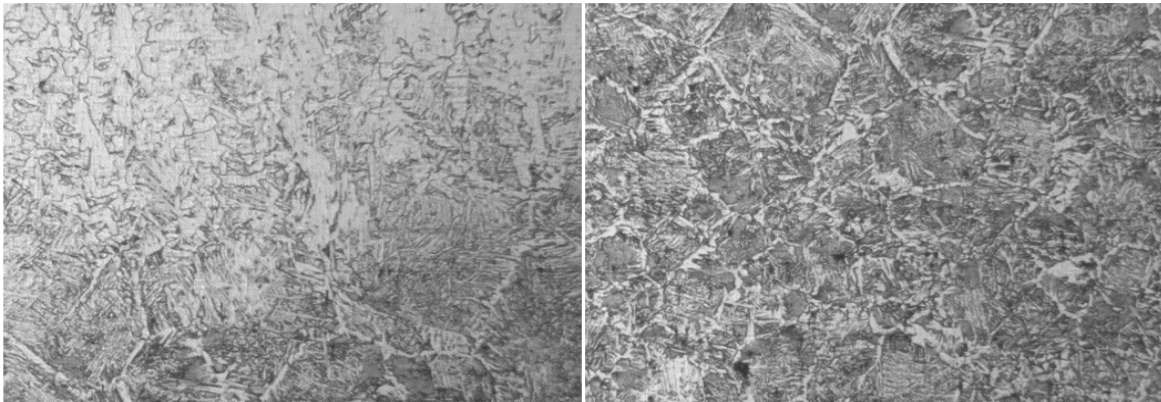


Figura 27. Límite del cordón (zona clara) con la ZAT (zona oscura) a la izquierda. A la derecha, ZAT con crecimiento de grano. Ambas imágenes a 50X

El bandeado en el metal base se debe por la deformación en caliente. Los granos, en ese momento, austeníticos se alargan y direccionan en el sentido de la laminación y por consecuencia de la segregación que existe al ir disminuyendo la

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

temperatura los bordes de grano austeníticos quedarán transformados en ferrita, mientras que el centro de cada grano acusa una transformación perlítica, típica de la reacción eutectoide de los aceros hipoeutectoides. Esto es lo que se puede visualizar en un corte longitudinal, sin embargo, el corte presente en la Figura 28 es transversal, por lo que es posible observar como gran parte de la ZAT sufre un cambio de tamaños de granos debido a las diferentes temperaturas alcanzadas a diferentes distancias del cordón.

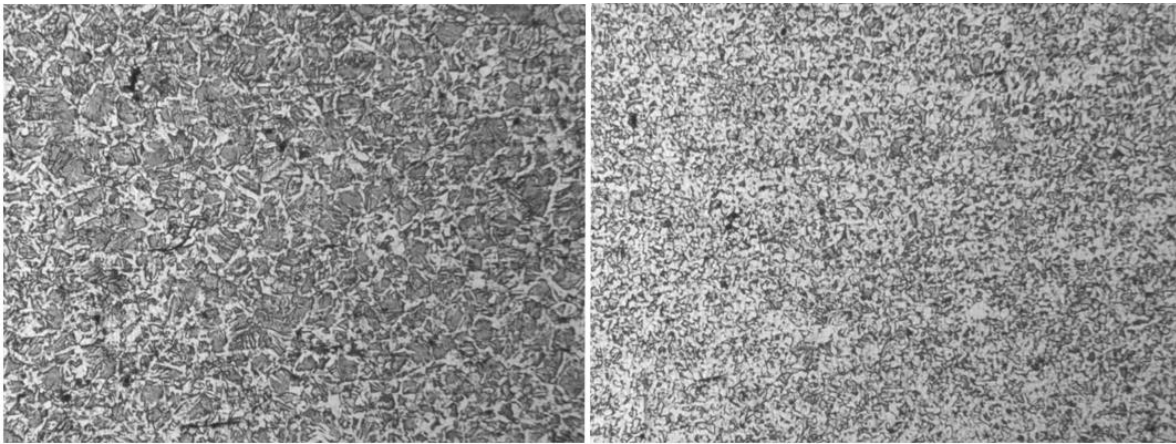


Figura 28. Zonas de la ZAT más alejadas. Se observa un grano más pequeño. Imágenes a 50X

Las mediciones de macro dureza se realizaron en la escala Rockwell B (HRB). Los resultados son presentados en gráficos de dureza versus distancia desde el centro del cordón. Para mejor entendimiento de estas mediciones, se presentan las fotografías de las zonas medidas, además de un macroataque sobre otra sección transversal del cordón del cupón 3, donde se puede apreciar una profundidad máxima entre 4 a 5 [mm]. (Ver Figura 29 y Figura 31).

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

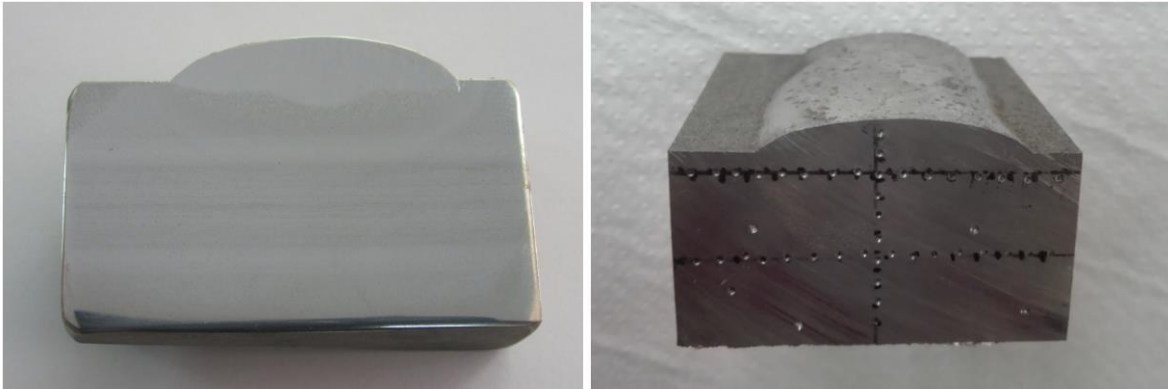


Figura 29. Sección transversal del cordón de soldadura del cupón 3. A la izquierda se muestra un macroataque y a la derecha las mediciones de dureza realizadas, donde las dos líneas paralelas corresponden a las series Alta y Baja, y la línea perpendicular a la medición en profundidad.

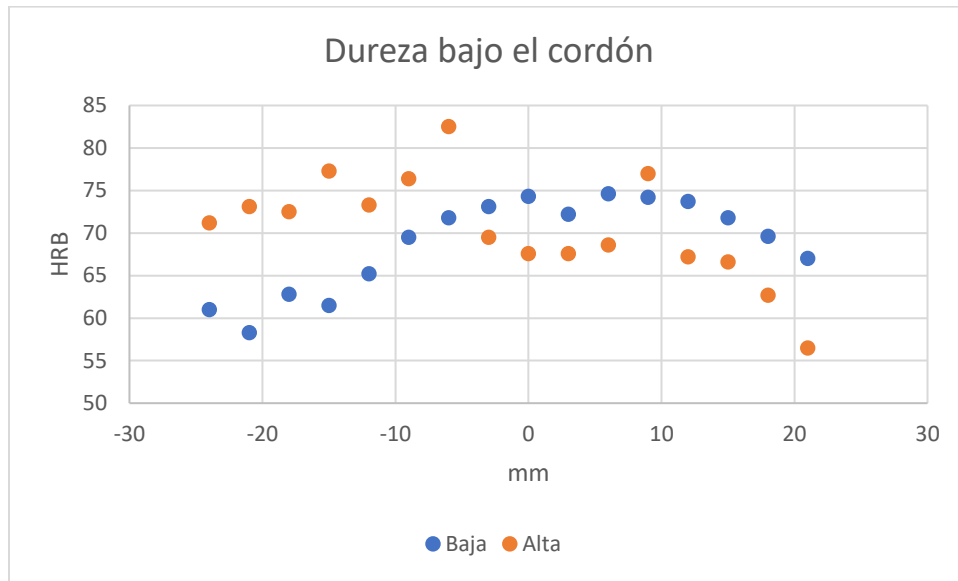


Figura 30. Mediciones de dureza bajo el cordón de soldadura a dos diferentes aturas.

Los valores obtenidos, más la Tabla 3 de la norma ASTM A 370, que entrega una transformación de datos de dureza HRB a esfuerzos máximos admisibles (UTS), permite apreciar que existe un aumento local del nivel de fluencia en toda el área circundante al cordón de soldadura. Esto se debe, sin dudas, al cambio microestructural sufrido por el metal por causa del ciclo térmico.

Se ensayaron 4 probetas fabricadas bajo la norma DIN 50125 C10x50, que tenían un diámetro central de $10 \pm 0,5$ [mm]. Estas pruebas de tracción realizadas con probetas sacadas desde las mismas planchas direccionadas, dos en forma transversal y dos en forma longitudinal a la dirección de laminado, tuvieron una

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

velocidad de ensayo de 5 [mm/min]. Se obtuvo que el esfuerzo de fluencia promedio del acero es de 288 [MPa], y el esfuerzo máximo (UTS) fue de 477 [MPa]. Con estos valores, se obtuvo una razón UTS sobre fluencia, que resultó ser de 1,65. Según los valores de dureza HRB medidos, el rango del UTS según la norma A 370 en el metal está entre los 385 y los 495 [MPa] en la zona adyacente al cordón, y con la razón UTS/fluencia, se puede obtener zonas donde el esfuerzo de fluencia puede alcanzar los 300 [MPa]



Figura 31. Marcas de la medición de dureza superficial desde el límite del cordón en el cupón 3.

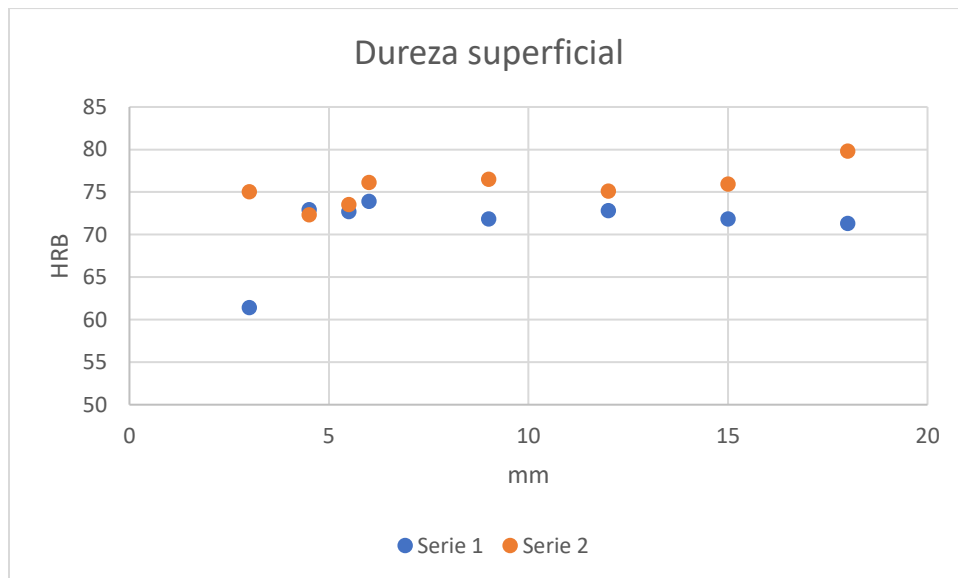


Figura 32. Mediciones de dureza superficial a diferentes distancias del límite del cordón.

3.5. Medición de Esfuerzos Residuales

Posterior a los tratamientos de los cupones, se procedió a la medición de esfuerzos a través del método del agujero ciego con galgas extensométricas. Estas mediciones se realizaron con el mismo procedimiento paso a paso, siguiendo la norma ASTM E 837 [16] y la nota técnica de Vishay NT 503 [14], fabricante de rosetas y otros instrumentos de micro-mediciones.

3.5.1. Preparación de superficies

Las placas, antes de aplicarles el cordón de soldadura, no poseían protección contra la corrosión, por lo que su estado superficial era de una capa de óxido significativamente gruesa. Por esta razón, fue necesario realizar una serie de preparaciones superficiales previas de cada cupón, antes de pegar las rosetas.

La primera limpieza fue un decapado. Este consiste en realizar un baño químico con una solución ácida de tal forma de soltar y eliminar toda capa de óxido superficial. Se utilizó 2,2 litros de una solución con 2 [g] de urotropina (Hexametilentetramina) y ácido clorhídrico al 17%, se sumergió cada cupón por separado en esta solución por un tiempo de 15 a 30 [min], dependiendo de qué tan saturada estuviese la solución (mientras más verde fuese la solución, más Fe contenía, por lo tanto, más saturada estaba).

En la Figura 33 se muestra el cupón 3, sumergido en la solución de decapado, realizada bajo campana. Éste fue el primero en ser sumergido en la solución, por lo que fue el más corto. Se observa que el líquido cercano al metal presenta un color verdoso, debido a la inmediata reacción que tiene la solución con el óxido. Al terminar de sumergir dos copones en la solución ácida (uno a la vez), se filtró para eliminar las partículas de.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

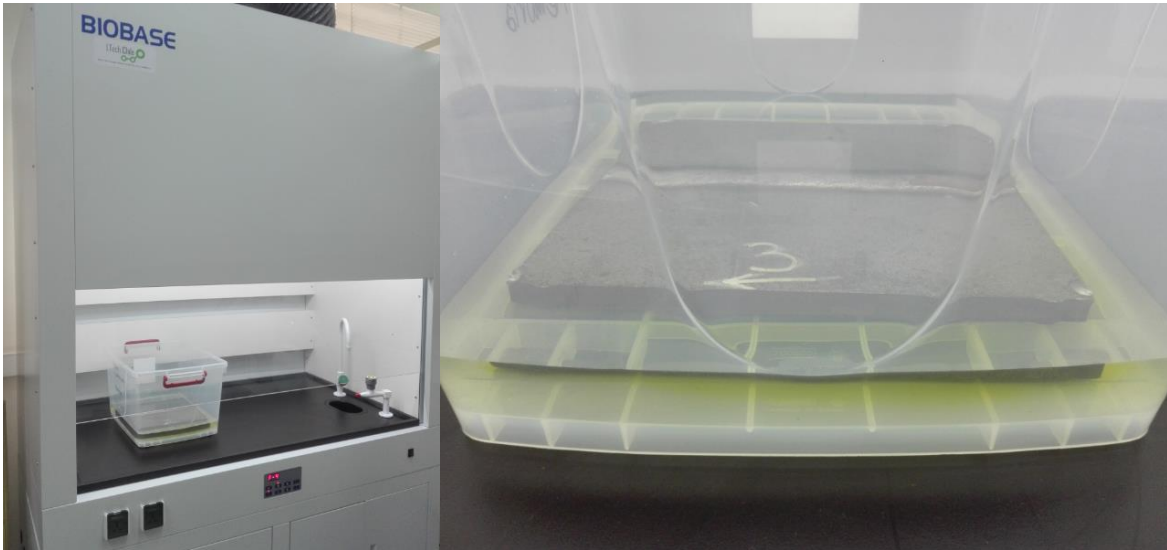


Figura 33. Cupón N°3 en baño ácido para decapado químico bajo campana. Se observa la solución verdosa cercano al metal e incolora en las esquinas.

Luego del baño ácido, se procedió a sacar la placa y lavarla con abundante agua destilada, con el fin de eliminar restos de la solución ácida. En seguida, en otro baño, se tuvo una solución de carbonato de sodio sobresaturado para neutralizar el ácido. Este baño neutralizador es corto y no fue necesario realizarlo bajo campana. Nuevamente se lavó cada cupón con abundante agua destilada, se roció con etanol y se secó bajo el secador de muestras, para eliminar restos de agua y así evitar una nueva oxidación de la superficie.

3.5.2. Lijado de puntos de medición

Como se mencionó en secciones anteriores de este informe, las placas pasaron por un proceso de granallado, con el fin de limpiarlas un poco antes de depositar un cordón de soldadura sobre ellas. Esto provocó que la superficie de cada cupón no fuese lisa, todo lo contrario, fue más bien rugosa. Esto hizo que la superficie no fuese idónea para adherir las rosetas, debido a que muy probablemente, la zona sensible de las estampillas no quedara en contacto íntimo con la superficie, dificultando y estropeando la medición.

Con estos antecedentes, además de algunas recomendaciones del fabricante de los strain gages (Vishay Precision Group), se optó por lijar manualmente los puntos de medición con lijas desde 240 hasta 800 [gr/in²]. Este procedimiento consistió en

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

cortar pequeños trozos de cada una de las lijas (240, 320, 400, 600 y 800) y pasarlas realizando movimientos circulares aleatorios, aplicando cada cierto tiempo un poco de agua destilada.

Los puntos de medición, por lo tanto, los que serían lijados fueron seleccionados por dos criterios principales. El primero, que estuviesen lo más centrales posibles y segundo, que el límite entre el cordón y el metal base fuese parejo. Se lijaron dos puntos por cupón, idealmente uno por cada lado del cordón y se debía tener en consideración que las rosetas serían pegadas a 5 [mm] distante del cordón, por lo que la zona inmediata a la soldadura debía quedar absolutamente pareja y lisa. Los 5 [mm] cumplen con tener una distancia dentro de la ZAT o muy cercana a ella, que asegurara la presencia de EE. RR. en cada punto de medición.

3.5.3. Pegado de Rosetas

El pegado de las rosetas es una de las etapas más delicada y sensible de la medición. Para asegurar un correcto funcionamiento de las rosetas se debe asegurar una correcta adherencia, una buena conexión eléctrica y una adecuada limpieza de la superficie. La medición por medio de galgas extensométricas se fundamenta en la sensibilidad por parte de los extensómetros de la roseta a las micro-deformaciones liberadas por la perforación realizada, por lo que una mala adherencia, no asegura una buena medición.

Luego de pasar la última lija, se procede a limpiar con etanol y la ayuda de un papel absorbente, que no deje restos ni pelusas, hasta que en el papel no queden indicios de suciedad, grasa, ni pequeños granos dejados por efecto del lijado. Cuando esto ocurre, se deja secar por unos minutos el etanol y se pega una cinta adhesiva transparente paralela al cordón y que tape totalmente la zona donde debe ir posicionada la roseta.

Posteriormente, se miden desde el límite del cordón hacia la zona preparada 4 [mm], y se marca una línea paralela al cordón sobre la cinta adhesiva previamente pegada, con un lápiz de tinta permanente, con el fin de guiar el pegado de la roseta para que quede paralela al cordón. Luego, se marca una línea perpendicular en la zona donde

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

se desea pegar la roseta, para no perder la posición en la cinta transparente. Con esto, se asegura que la perforación quede a 5 [mm] del límite del cordón.



Figura 34. Fotografías de pasos del pegado de estampillas. En la primera imagen se ven las líneas de guía sobre la cinta adhesiva. En las siguientes fotos, se ve la estampilla pegada y la distancia al cordón.

Luego de marcar la posición de la roseta, se despega de un solo lado la cinta transparente y por el lado del pegamento, se adhiere la estampilla con la cara superior en contacto con la cinta, en la zona marcada anteriormente con el lápiz permanente. En seguida se esparce una pequeña gota de pegamento Loctite 401, y se vuelve a pegar la cinta, esta vez con la roseta sobre la gota de pegamento y bajo la cinta transparente. Se presiona por un minuto y luego se despega cuidadosamente la cinta, cuidando que la estampilla quede adherida al metal y no a la cinta.

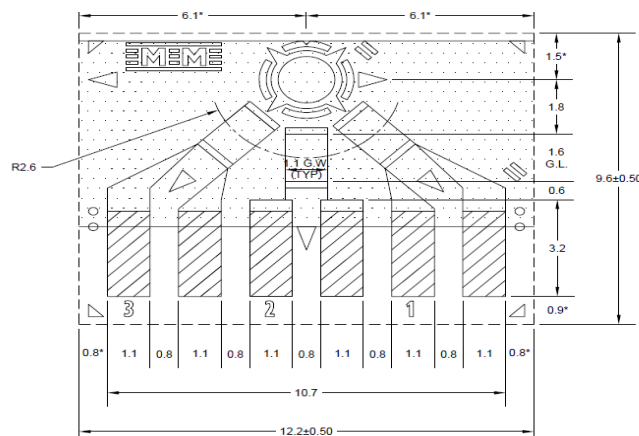


Figura 35. Plano roseta 062 UM.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

El tipo de roseta que se utilizó es del modelo CEA 062 UM, y en la Figura 35 se presenta su plano. Cada canal posee una resistencia eléctrica de 120 [Ω]. Toda la zona sensible de la roseta, excepto lo zona de conexión eléctrica, está recubierta con el mismo plástico con el que está hecha la estampilla, de tal forma que se evita la oxidación de los pequeños y delgados alambres de los extensómetros de cada uno de los canales. Esta roseta fue seleccionada porque daba la facilidad de medición en un borde cercano y paralelo al cordón, posee un diámetro geométrico al centro de cada extensómetro de 5,13 [mm]. Los canales 1, 2 y 3 están posicionados en 45, 90 y 135° sentido horario desde la horizontal.

Luego de esperar otros minutos, para asegurar que seque completamente el pegamento, se deben realizar las conexiones eléctricas. Lo primero es pegar a un par de centímetros, un trozo de tarjeta de circuitos eléctricos con 9 puntos de conexión. Con la ayuda de un cautín de punta fina, se estañan todos los puntos a conectar, tanto del trozo de tarjeta como de la roseta. Se deben conectar 6 de los nueve puntos de la tarjeta en pareja e intercalar cada par con un punto individual, como muestra la Figura 36.



Figura 36. Estampilla y trozo de tarjeta estañadas (izquierda) y cables conectados desde cada punto de la estampilla (6 puntos) a la tarjeta (3 individuales y 3 en pares).

Acto seguido, se conectan la estampilla con la tarjeta, con pequeños cables (Ver Figura 36), testeando cada vez con un multitester, comprobando la resistencia de cada galga que debe ser de 120 [Ω]. Si la resistencia de cada uno no es la correcta, quiere decir que la conexión está mal hecha o presenta algún corto circuito. El fin de instalar el trozo de tarjeta es facilitar la conexión que requiere el circuito antes de

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

ser conectado al equipo P3, y también, evitar que por un brusco movimiento del cable se estropee la roseta, tiene un menor costo cambiar un cable y/o la tarjeta de conexión que volver a instalar una nueva roseta en el mismo punto de medición.

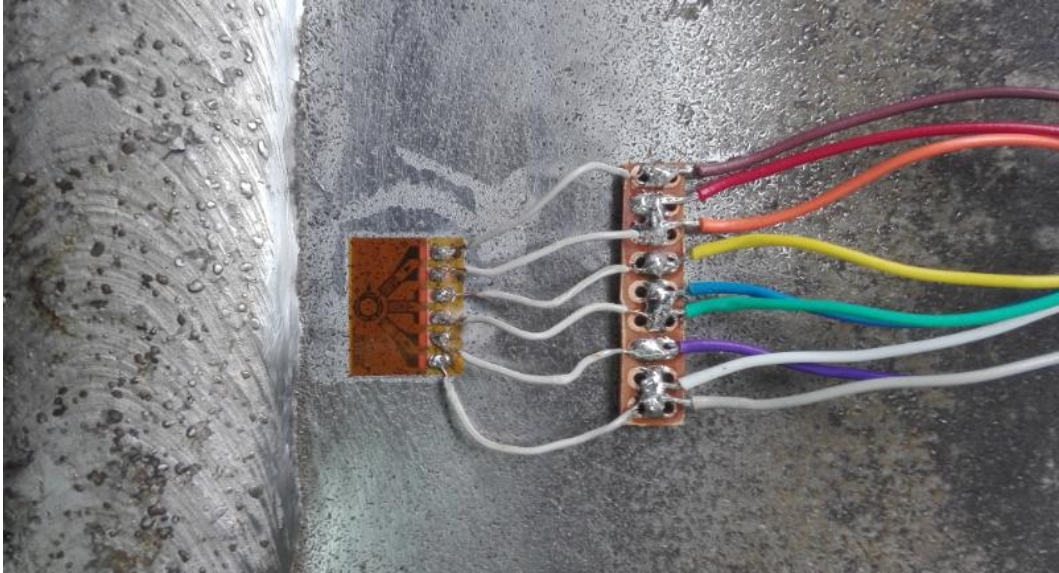


Figura 37. Instalación final de la estampilla, lista para realizar la perforación y medición.

La salida de la tarjeta es a través de 9 cables conductores, separados en 3 canales, uno por cada extensómetro. El primer canal corresponde a la galga 1, diferenciable por los colores café, rojo y naranja, el canal 2 posee los colores amarillo, azul y verde, y el canal 3 presenta el color morado, blanco y gris. Todas las rosetas se instalaron de la misma forma, con la misma regla de colores en los canales 1, 2 y 3, aunque se debe considerar que siempre los canales presentan un conductor en serie y los otros dos en paralelo. Los conductores en serie siempre fueron los colores café, amarillo y morado, para los canales 1, 2 y 3 respectivamente, y el orden del resto de los colores es irrelevante, pero siempre manteniendo el grupo de los mismo tres colores para cada canal. En la Figura 37 se puede ver lo descrito, siendo esta la configuración final para posteriormente realizar la medición, perforando el centro geométrico de la estampilla señalado por el círculo cercano al cordón.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

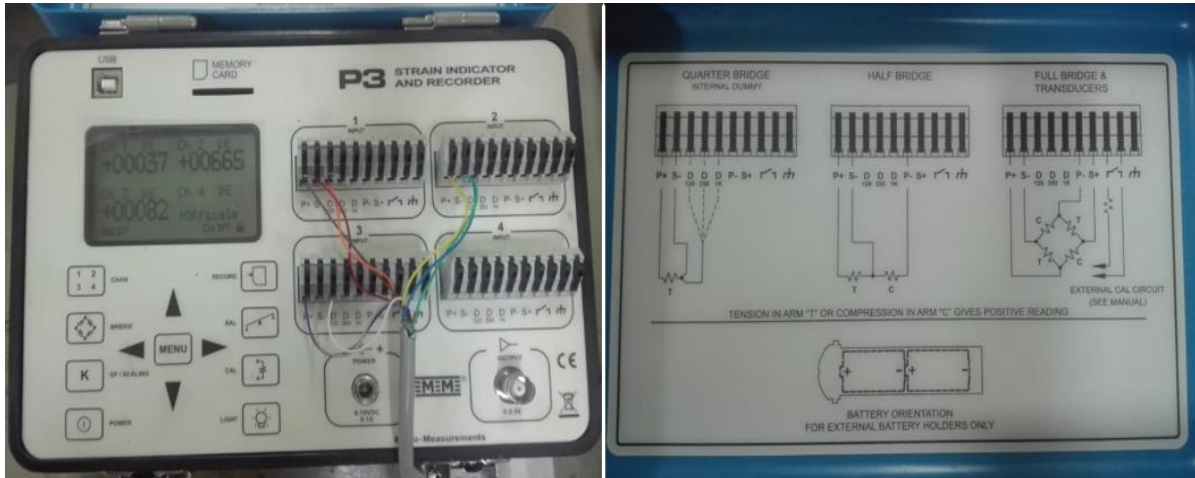


Figura 38. Conexión utilizada (cuarto de puente) y diferentes formas de conectar el equipo según requerimiento (cuarto de puente, medio puente y puente completo).

Los 9 cables de salida de la roseta son la entrada del equipo Model P3, como se muestra en la Figura 38, que lee las señales eléctricas que viajan por cada canal y son traducidas en datos de microdeformaciones ($\epsilon \times 10^{-6}$), que posteriormente son guardadas en un archivo de texto por el mismo equipo P3.

El indicador y registrador de deformación Model P3 es un instrumento portátil que funciona con baterías, capaz de aceptar simultáneamente cuatro entradas de circuitos de galga extensométrica de cuarto, mitad y puente completo, incluidos transductores basados en galga extensora. El P3 funciona como amplificador de puente, indicador de deformación estática y registrador de datos digital.

Posee una interfaz fácil de usar, donde las selecciones incluyen canales activos de entrada y salida, configuración de puentes, unidades de medición, balance de puentes, método de calibración y opciones de registro, entre otras. Los datos, grabados a una velocidad seleccionable de hasta 1 lectura por canal por segundo, se almacenan en una tarjeta extraíble (SD) y se transfieren por USB a una computadora para su posterior almacenamiento, reducción y presentación con el software suministrado. El P3 también se puede configurar y operar directamente desde la PC con una aplicación de software.

El equipo permite mediciones de $\pm 0.1\%$ de precisión y una resolución de 1 microstrain. La vida útil de la batería depende del modo de operación, pero tiene un

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

rango de hasta 600 horas de uso continuo para un solo canal. También se puede alimentar mediante la conexión a una batería o fuente de alimentación externa, un puerto USB en una PC o con un adaptador de voltaje de línea externo opcional.

3.5.4. Perforación y Adquisición de datos

Las perforaciones destinadas a medir los EE. RR. fueron hechas en un Centro de Mecanizado CNC marca Hightech, modelo XH714 en el laboratorio de Diseño y Manufactura (DIMA) de la UTFSM en la Sede Viña del Mar.

En el centro de mecanizado, se perforó cada punto de medición de todos los cupones (14 puntos en total), con fresas dentales cilíndricas de 1,6 [mm] de diámetro, a 15.000 RPM. La perforación tuvo una profundidad total de 2 [mm], y cada cupón se le perforó con fresas nuevas, para evitar algún tipo de error en la perforación por el desgaste de las fresas, aunque cabe señalar que cada vez que se cambió una de estas herramientas de corte, nunca presentaron un daño de pérdida de filo, ni rotura de algún diente, ni cambio de color por temperatura, etc, su comportamiento siempre fue óptimo y el cambio se realizó por precaución en todos los casos.

Para comenzar la perforación, se posicionó un cupón con una roseta pegada y conectada al equipo P3 sobre tres pequeñas barras de acero, para asegurar el paralelismo entre el plano del CNC y el cupón. Se montó una fresa en el porta broca del centro de mecanizado y se comenzó a acercarse manualmente hasta que la fresa estuviese cerca del punto de perforación. Luego, con la ayuda de una linterna, y con el control de movimiento posicionado en la milésima de milímetro, se afinó el posicionamiento de la fresa justo sobre el círculo de perforación dibujado en la roseta.

El siguiente paso fue realizar la “búsqueda del cero”. Este paso consistió en comenzar a perforar, cuidando sensible y visualmente que, solo se atravesara la roseta hasta rosar el metal. Visualmente se puede observar que sale una viruta del color del plástico de la roseta, como se observa en la Figura 39. Sensiblemente, existe un cambio de sonido y hay una pequeña variación en los valores de los

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

canales correspondientes a cada galga. Es en este punto, donde cambian levemente los valores de los canales (variación menor a ± 5) que se vuelven los valores de los canales a cero y el valor de profundidad en el CNC también es marcado como cero.

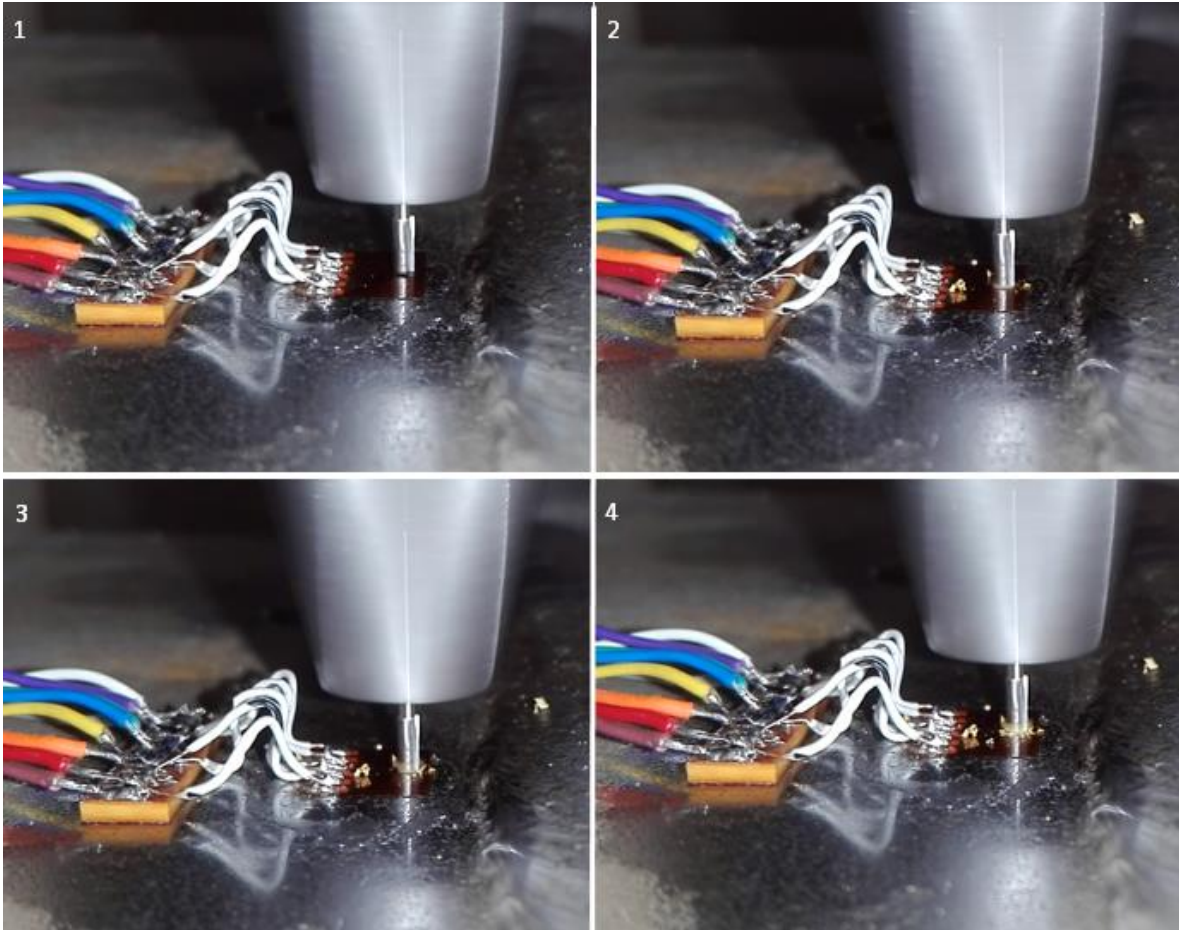


Figura 39. Secuencia de perforación de "búsqueda del cero"

Con todos los valores controlados por la medición indexados en cero, se comienza la perforación. Se realizó la adquisición de datos por perforación tomando 8 datos, uno por cada paso con avances de 0,25 [mm] hasta un total de 2 [mm] de profundidad. Estos datos corresponden al set necesario para el cálculo de EE. RR. uniformes.

Así como se mencionó en la búsqueda del cero, cada vez que se quita material metálico con la fresa en la perforación, los valores de los canales varían en una cantidad proporcional a la deformación liberada por efecto de las tensiones

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

presentes en la zona de la perforación. Esta variación quedó grabada en un archivo de texto, de forma manual, cada vez que finalizaba un paso de 0,25 [mm]. Esto quiere decir que el set de datos de cada perforación contuvo 8 datos. En la Figura 40 se puede ver uno de los puntos de medición antes y después de ser perforado. En la imagen de la izquierda, si se observa con detalle, se pueden ver los números 1, 2 y 3 (de arriba abajo está primero el 3, luego el 2 y finalmente el 1). Estos números indican el número del extensómetro que, para efectos de simplificación de los cálculos, se conectan con el canal correspondiente, es decir, el canal 1 con la galga 1 y así sucesivamente.

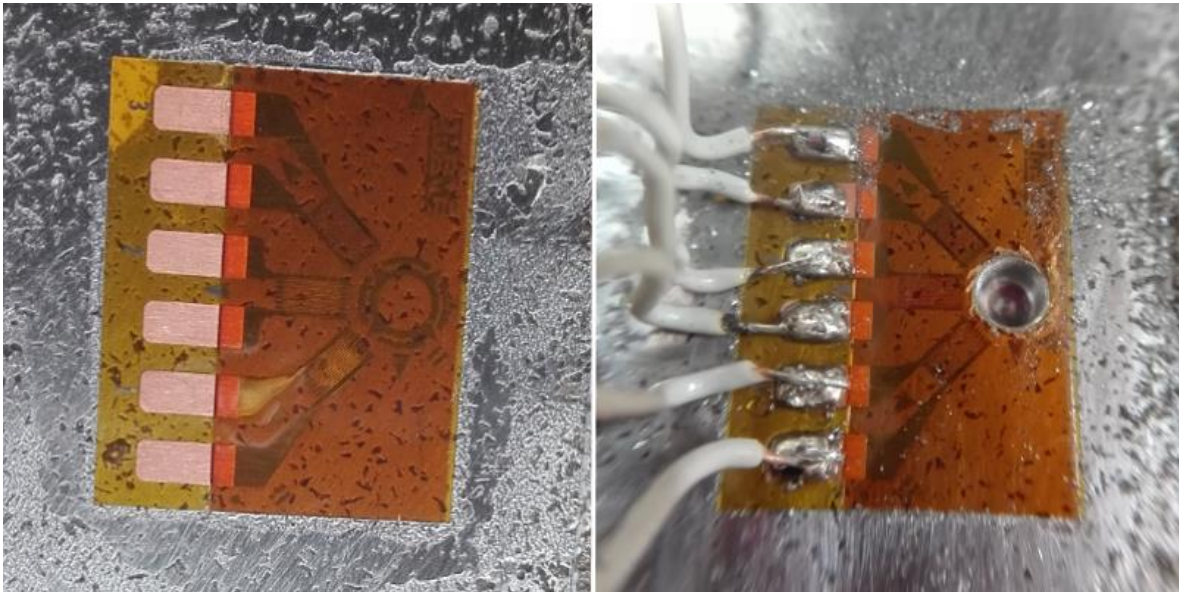


Figura 40. Roseta antes y después de la perforación. Se observa el fondo plano del orificio y marcas de la fresa en el borde del agujero.

3.6. Cálculo de Esfuerzos

El primer indicador de una buena medición corresponde a la tendencia de los datos obtenidos directamente de la medición, la cual debe ser suave, sin saltos ni cambios bruscos. En la Figura 41 se puede ver un buen ejemplo de una tendencia suave de los datos, donde no se observa ninguna anomalía. Estos datos corresponden al segundo punto de medición del cupón 1, el cual recibió el tratamiento vibratorio por 30 minutos a 100 [V].

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

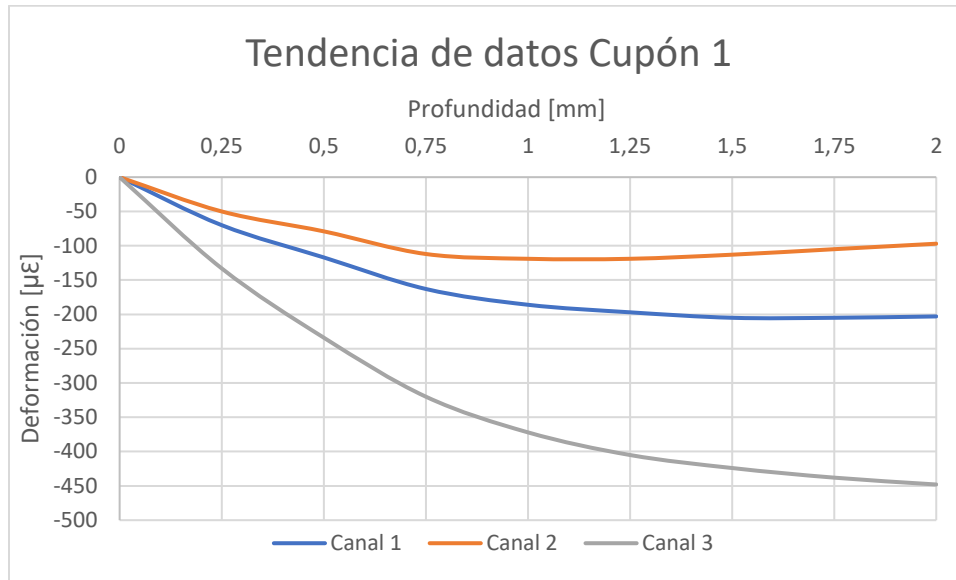


Figura 41. Datos de deformación versus profundidad.

Comprobada la tendencia suave de los datos, se procedió a calcular los parámetros p , q y t con las siguientes fórmulas descritas en la norma:

$$p = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \quad (1)$$

$$q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \quad (2)$$

$$t = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{2} \quad (3)$$

Luego de calcular estos valores para cada paso de la perforación, se debe chequear si los datos sirven o no para ser considerados aptos para una medición de esfuerzos uniformes. Esto se logra graficando % de deformación p y % de deformación q o t versus una razón entre la profundidad de la perforación y el diámetro de la roseta utilizada, que para este caso corresponde a $D= 5,13$ [mm]. El gráfico que debería obtenerse con estos datos es similar al de la Figura 42 que se presenta a continuación.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

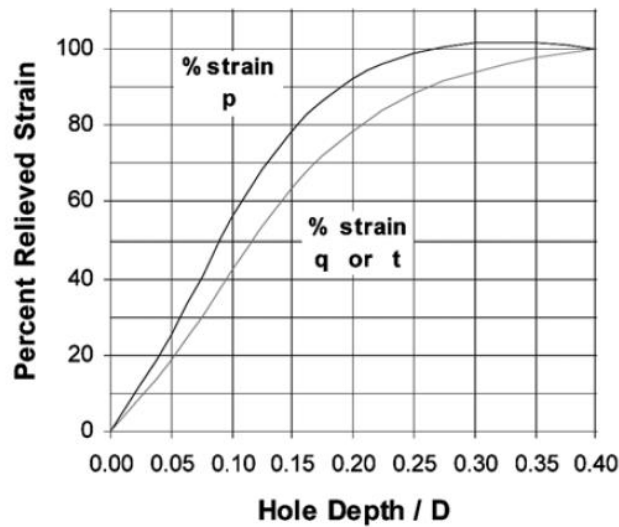


Figura 42. Típico gráfico de porcentaje de deformación versus razón de profundidad.

Posteriormente, desde la Tabla 3, de la norma ASTM 837-08, se deben obtener las constantes de calibración \bar{a} y \bar{b} según la profundidad de la perforación y el tipo de roseta utilizado. Con estos valores es posible calcular los parámetros P, Q y T con las siguientes fórmulas:

$$P = \frac{E}{1 + \nu} \frac{\sum(\bar{a} * p)}{\sum \bar{a}^2} \quad (4)$$

$$Q = -E \frac{\sum(\bar{b} * q)}{\sum \bar{b}^2} \quad (5)$$

$$T = -E \frac{\sum(\bar{b} * t)}{\sum \bar{b}^2} \quad (6)$$

Con estos valores de P, Q y T se pueden calcular los esfuerzos en el plano cartesiano, σ_x , σ_y y τ_{xy} ; y los esfuerzos principales $\sigma_{\text{máx}}$, $\sigma_{\text{mín}}$, además del ángulo en el que se encuentra posicionado el esfuerzo máximo $\sigma_{\text{máx}}$ a partir de la posición de la galga 1, y también la posición del esfuerzo mínimo a partir del extensómetro 3, todas las direcciones en sentido horario (a favor de las manecillas del reloj). Para todo esto se deben utilizar las siguientes formulas:

$$\sigma_x = P - Q \quad (7)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad (8)$$

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

$$\tau_{xy} = T \quad (9)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x}, \sigma_{m\acute{i}n} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right) \quad (11)$$

Calculados todos estos valores, se compararon con una sola indicaci3n m1s. Esta es que, si los valores de esfuerzo exceden el 60% del valor del esfuerzo de fluencia del material, se deben reportar estos valores 1nicamente como "indicativos", es decir, que no es posible confiar con certeza que los valores son cuantitativamente los correctos.

Por otro lado, la NT 503 [14], permite realizar un c1lculo de los esfuerzos principales a cada paso de profundidad, con lo que se puede comprobar la uniformidad o no del esfuerzo en la profundidad, con las siguientes f3rmulas:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{m\acute{i}n} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (13)$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (14)$$

Las constantes A y B son obtenidas desde las constantes de calibraci3n \bar{a} y \bar{b} , presentes en la norma E-837.

4. Resultados y Discusión

4.1. Esfuerzos Residuales Medidos

Los datos de cada medición fueron traspasados a una hoja de cálculo de Excel, donde se trabajó con ellos para realizar el procesamiento de los datos de esfuerzos uniformes.

Se realizaron 14 perforaciones, y por lo tanto 14 mediciones, en los 7 cupones tratados de diferentes modos, ya sea por vibraciones, térmicamente o sin tratamiento. De estas 14 mediciones, 11 fueron exitosas o se obtuvieron datos satisfactorios de los cuales se puede alcanzar algún tipo de conclusión. Los datos arrojados por el P3 corresponden a los indicados en la Tabla 5 arrojados en micro-deformación ($\mu\epsilon$), por lo que se debe multiplicar cada dato por 10^{-6} para poder trabajar con ellos de manera correcta en deformación (ϵ).

Tabla 5. Datos de la medición 1 del cupón 1.

Cupón 1.1	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-70	-50	-133	-7,00,E-05	-5,00,E-05	-1,33,E-04
0,50	-117	-79	-234	-1,17,E-04	-7,90,E-05	-2,34,E-04
0,75	-163	-112	-320	-1,63,E-04	-1,12,E-04	-3,20,E-04
1,00	-186	-119	-372	-1,86,E-04	-1,19,E-04	-3,72,E-04
1,25	-197	-119	-405	-1,97,E-04	-1,19,E-04	-4,05,E-04
1,50	-205	-113	-424	-2,05,E-04	-1,13,E-04	-4,24,E-04
1,75	-205	-105	-438	-2,05,E-04	-1,05,E-04	-4,38,E-04
2,00	-203	-97	-448	-2,03,E-04	-9,70,E-05	-4,48,E-04

Así como con este conjunto de datos, se realizó esta operación para los 14 set de datos, cuyos resultados son adjuntados en los anexos de este informe desde la Tabla 10 hasta la

Tabla 22, además en la Tabla 6 se muestran los valores de todas las operaciones descritas en las fórmulas de la (1) a la (3), señaladas en la sección 3.6 de este trabajo, para la primera medición del cupón 1. El resto de los resultados de estas operaciones se presentan en los anexos, desde la Tabla 25 hasta la Tabla 35.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 6. Valores de p, q, t y sus porcentajes con respecto al último valor de cada uno, para el cupón 1, primera medición.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t
0	0	0	0	0	0
0,25	-1,02,E-04	-3,15,E-05	-5,15,E-05	31,18	22,54
0,50	-1,76,E-04	-5,85,E-05	-9,65,E-05	53,92	42,23
0,75	-2,42,E-04	-7,85,E-05	-1,30,E-04	74,19	56,67
1,00	-2,79,E-04	-9,30,E-05	-1,60,E-04	85,71	70,02
1,25	-3,01,E-04	-1,04,E-04	-1,82,E-04	92,47	79,65
1,50	-3,15,E-04	-1,10,E-04	-2,02,E-04	96,62	88,18
1,75	-3,22,E-04	-1,17,E-04	-2,17,E-04	98,77	94,75
2,00	-3,26,E-04	-1,23,E-04	-2,29,E-04	100,00	100,00

Los resultados de la Tabla 6, se graficaron para cada medición, correspondientemente (Ver Figura 43 a Figura 49) y fueron contrastados con la tendencia que exige la norma para considerar cada set de datos como válido y posteriormente realizar los cálculos de esfuerzos.

En los gráficos, las líneas continuas corresponden a la tendencia teórica expresada por la norma (Ver Figura 42), mientras que los puntos son los valores experimentales obtenidos en cada medición. Las líneas azules corresponden a los porcentajes de relajación de deformaciones con respecto al parámetro p, mientras que las líneas naranjas corresponden a los porcentajes con respecto a q o t. Por otro lado, los puntos grises son los valores medidos del porcentaje de alivio para p y los puntos amarillos corresponden a los porcentajes de q o t.

Existieron 3 set de datos absolutamente fuera de tendencia, correspondientes a las segundas mediciones de los cupones 2, 4 y 7, descartando como válidas esas mediciones y considerando solo un set de datos por cada uno de los cupones antes mencionados. Para el resto de los cupones, las tendencias son aceptables y se encuentran dentro de un rango de validez.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

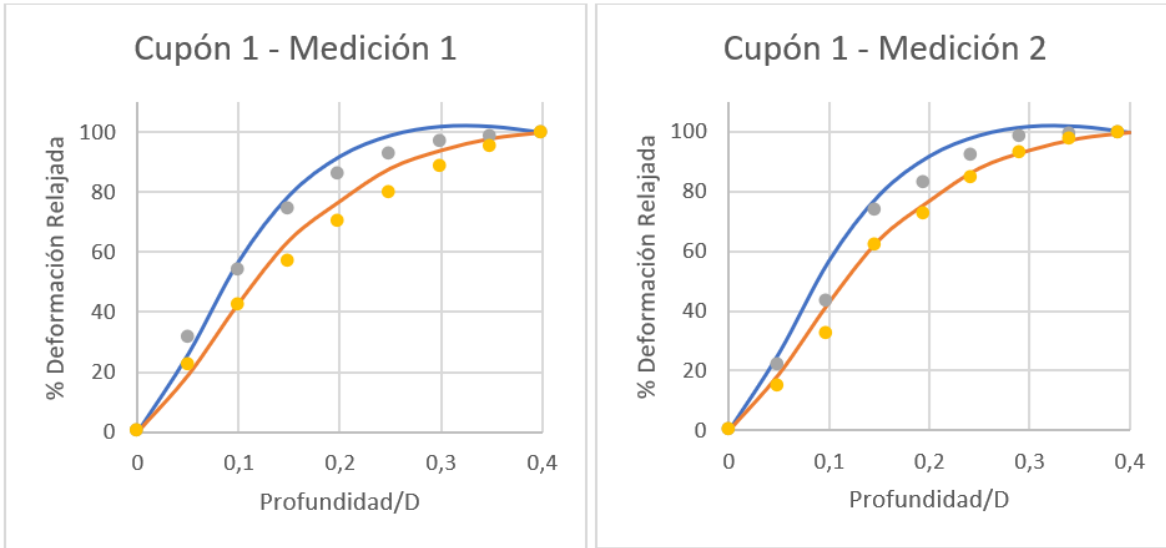


Figura 43. Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 1.

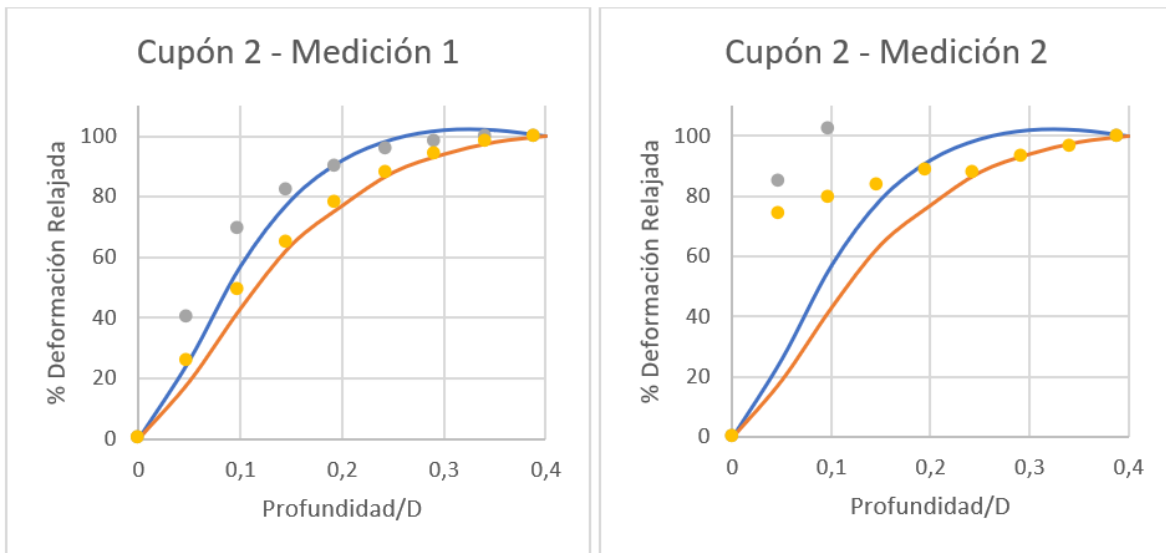


Figura 44. Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 2.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

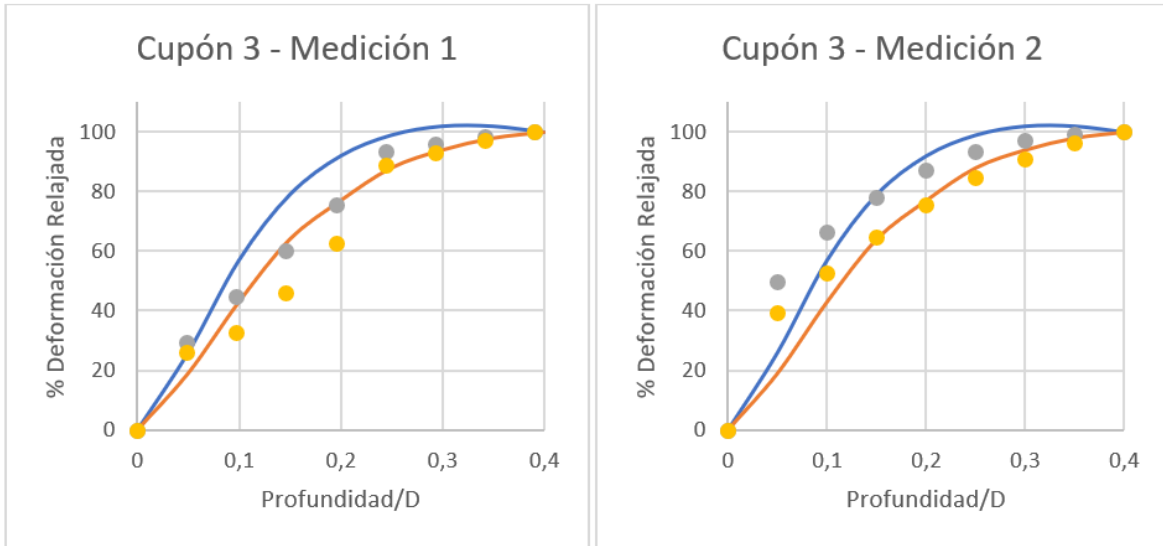


Figura 45. Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 3.

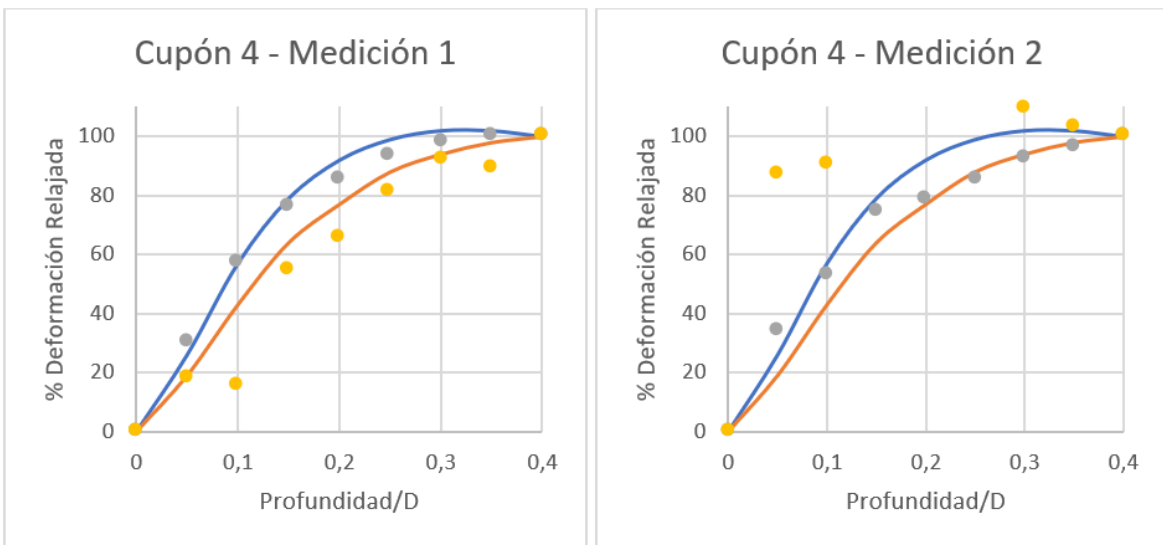


Figura 46. Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 4.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

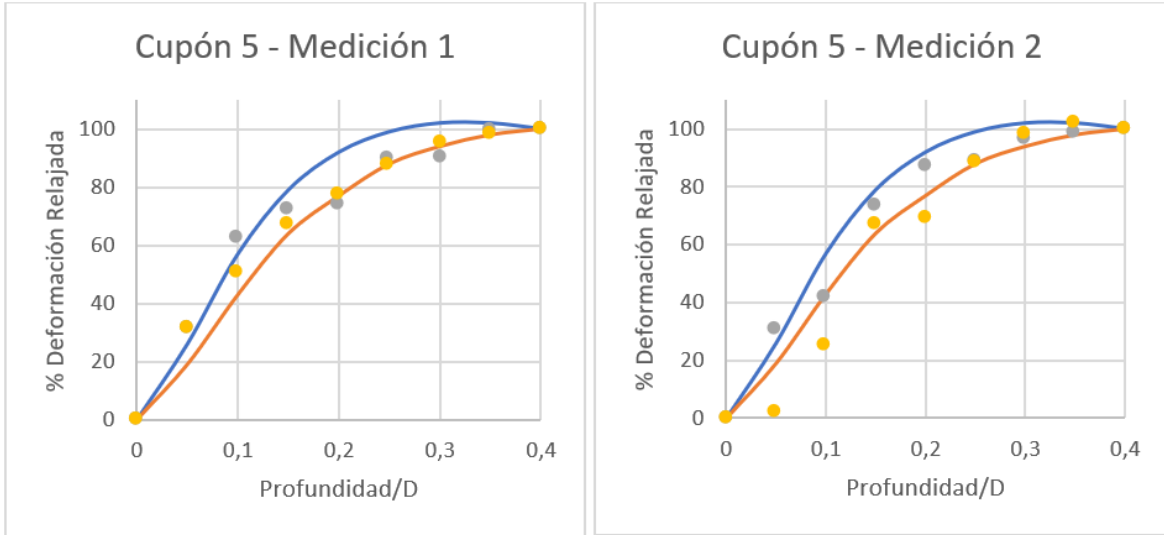


Figura 47. Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 5.

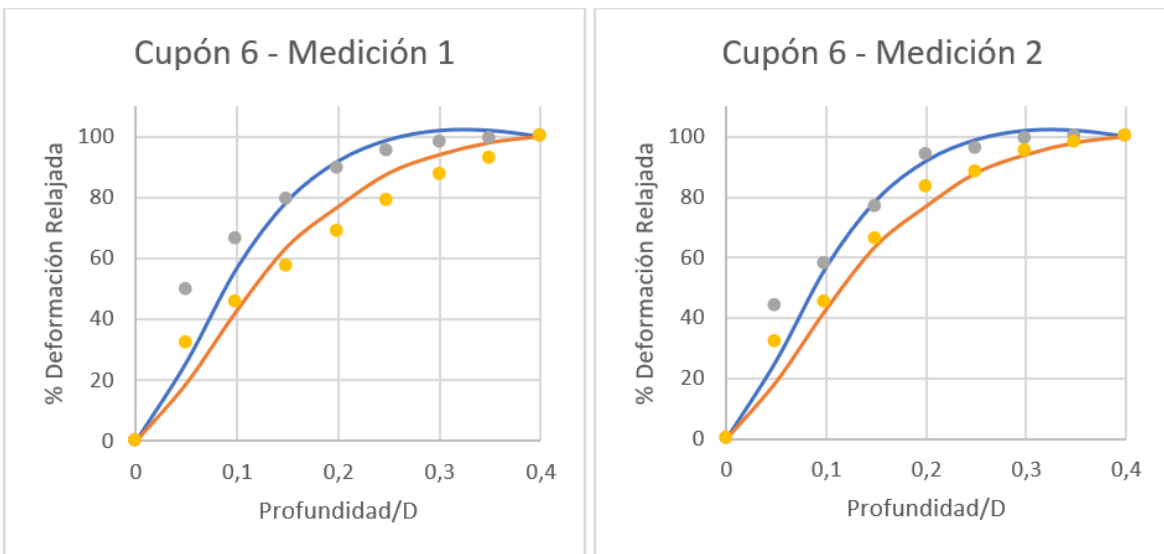


Figura 48. Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 6.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

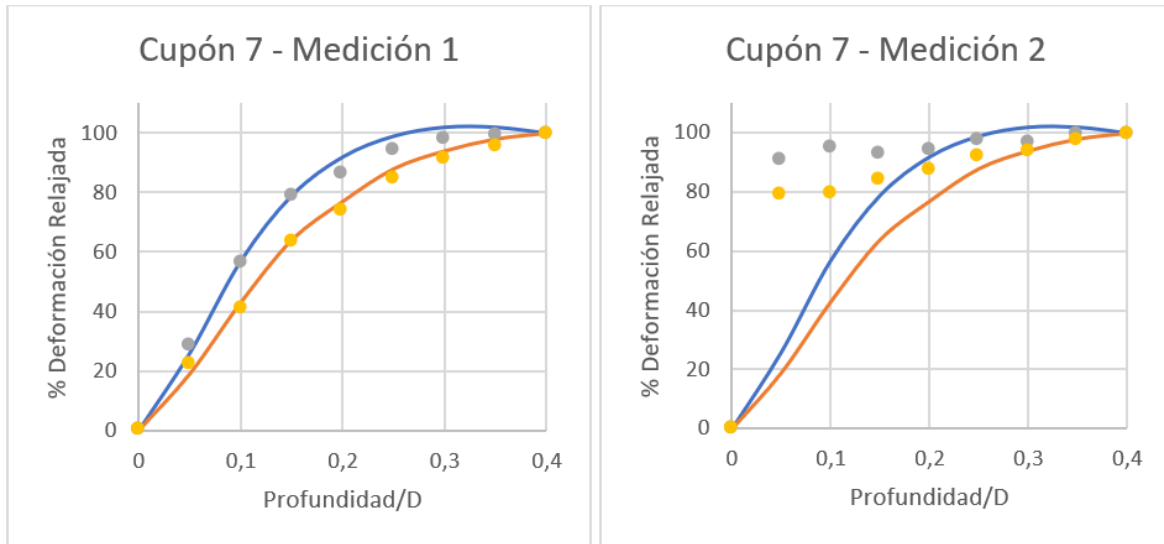


Figura 49. Validación de datos para cálculo de esfuerzos para el cupón 7.

Los resultados observados desde estos gráficos indican que la mayoría de los datos cumplen con las condiciones para considerar como válido un cálculo de esfuerzos, salvo las segundas mediciones de los cupones 2, 4 y 7 que están absolutamente fuera de la banda de tendencia entregada por la norma, sobre todo en la parte inicial de la curva, lo que indica una rápida liberación de deformación al comienzo de la perforación. Estos valores pueden encontrar una explicación en un factor muy importante de la medición, como lo es la deformación de las paredes interiores del taladro.

Las deformaciones en las paredes laterales de la perforación quedan de manifiesto en el diámetro real de cada orificio, que en todas las mediciones fue mayor al diámetro de la herramienta de perforación, en la cual se encuentra la explicación de este suceso, ya que al ser una fresa y no una broca, los filos provocan un pequeño descentrado de la herramienta, traducido en una mínima vibración, afectando principalmente, las paredes de cada perforación. Cabe mencionar que no es posible utilizar una broca, debido a la necesidad del fondo plano de cada taladro. Al existir una deformación extra y siendo los extensómetros sensores de deformación, hay acá una importante fuente de error.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Con los valores calculados en la Tabla 6 más las constantes a y b, es posible calcular las ecuaciones de la (4) a la (11) con la ayuda previa del producto entre estas variables, mostradas en la Tabla 7 para la primera medición del cupón 1.

Tabla 7. Valores calculados a partir de constantes a y b, para Do/D de 0,35. Cupón 1, medición 1.

Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,039	0,078	1,52,E-03	6,08,E-03	-3,96,E-06	-2,46,E-06	-4,02,E-06
0,50	0,087	0,179	7,57,E-03	3,20,E-02	-1,53,E-05	-1,05,E-05	-1,73,E-05
0,75	0,123	0,269	1,51,E-02	7,24,E-02	-2,97,E-05	-2,11,E-05	-3,48,E-05
1,00	0,145	0,336	2,10,E-02	1,13,E-01	-4,05,E-05	-3,12,E-05	-5,38,E-05
1,25	0,156	0,381	2,43,E-02	1,45,E-01	-4,70,E-05	-3,96,E-05	-6,93,E-05
1,50	0,160	0,410	2,56,E-02	1,68,E-01	-5,03,E-05	-4,49,E-05	-8,26,E-05
1,75	0,160	0,427	2,56,E-02	1,82,E-01	-5,14,E-05	-4,97,E-05	-9,24,E-05
2,00	0,158	0,437	2,50,E-02	1,91,E-01	-5,14,E-05	-5,35,E-05	-9,99,E-05

Las constantes a y b dependen de la razón entre el diámetro de la perforación (Do) sobre el diámetro geométrico de la roseta (D), que es igual para todas las rosetas de este tipo (tipo B) y tiene un valor de 5,13 [mm]. El diámetro de perforación, teóricamente, debería ser igual al diámetro de la herramienta de perforación, que en este caso fue de 1,6 [mm], sin embargo, experimentalmente, el diámetro siempre fue mayor y varió entre los 1,72 a los 2,01 [mm]. Esto hizo que la razón D/Do fluctuara entre 0,34 y 0,39, dependiendo de la perforación realizada. Para el caso de los valores de la Tabla 7, la razón Do/D fue de 0,35. Los valores de las constantes a y b se puede consultar en la Tabla 23 y Tabla 24 en los anexos.

Finalmente en la Tabla 8, se muestran los resultados finales logrados después de los cálculos realizados para la primera medición del cupón 1. Acá los valores de P, Q y T se utilizan directamente para obtener los esfuerzos y la dirección del esfuerzo máximo principal, con respecto la posición del canal 1.

Tabla 8. Resultados finales para la medición 1 del cupón 1. Valores de esfuerzo en mega Pascales.

P	Q	T	σ_x	σ_y	T_{xy}	σ máx	σ mín	θ
331095963	58409172	104809026	273	390	105	451	211	30°

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Para recordar lo descrito en la Tabla 4, los cupones 1, 2, 6 y 7 fueron tratados con vibraciones, a los cupones 3 y 4 se les aplicó un tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos y el cupón 3 es el llamado caso base, el cual no tiene ningún tipo de tratamiento de alivio de EE. RR. Teniendo en consideración lo detallado, se realizó una tabla resumen con los resultados de las mediciones y los valores (promedios, cuando corresponda) de esfuerzos máximos de cada cupón.

Tabla 9. Resumen de resultados con valores de esfuerzos máximos y porcentaje remanente con el Caso Base (Cupón 3).

Cupón	Esfuerzo [mPa]	% remanente	tipo de tratamiento
1	502	87,0%	30 min – 100 V
2	585	101,3%	10 min – 100 V
3	577	100,0%	Caso Base
4	137	23,7%	Recocido
5	124	21,5%	Recocido
6	522	90,4%	10 min – 200 V
7	312	54,1%	30 min – 200 V

En la Tabla 9 se comparan los resultados de todas las mediciones entre sí, además de asignar un porcentaje con respecto a un valor base, correspondiente al Caso Base (cupón 3). Como todos los tratamientos aplicados a los cupones fueron realizados con el fin de reducir el nivel de EE. RR, es correcto llamar a este porcentaje como un valor remanente con respecto al caso base y se asume que todos los cupones parten de un valor de tensiones residuales igual al cupón 3. Además, por lo que señala la norma ASTM E-837, y dado los valores elevados de esfuerzos (mayores al 160% del valor del esfuerzo de fluencia del material que es 260 [MPa]), estos resultados deben ser considerados referencialmente. Con respecto a esta última idea, los valores de dureza más los esfuerzos de fluencia obtenidos experimentalmente hacen posible que los esfuerzos residuales próximos al cordón puedan ser mayores que el esfuerzo de fluencia nominal del metal base, lo que explicaría los altos niveles de esfuerzos en las mediciones de algunos cupones, aun así, superan el 60% del valor de fluencia dejando las mediciones como valores referenciales.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Los porcentajes comparativos enseñados en la Tabla 9 indican que, aunque pequeña en algunos casos, hubo una reducción de los esfuerzos residuales con respecto al cupón 3, salvo el cupón 2 que es esencialmente igual y las pequeñas diferencias tienen explicación en la variación normal de una medición. Bajo este precepto los cupones 4 y 5 (PWHT) presentan el mismo tratamiento, por lo que sus diferencias también son atribuidas al margen de variabilidad de la medición. Esta incertidumbre tiene su origen, como se mencionó anteriormente, en la utilización de una herramienta de corte y no de perforación, precisión de 0,1% del equipo P3, resolución del equipo de CNC de 0,001 [mm] que controlaba la profundidad y finalmente, el centrado manual de la perforación en el centro geométrico de la roseta.

Los casos en que más se redujo el nivel de esfuerzos fueron los cupones 4 y 5, tratados a través de un recocido. A ambos cupones se les aplicó el mismo recocido, en el mismo horno de tratamientos térmicos, al mismo tiempo, por esto es de esperar que su nivel de esfuerzos fuese similar, alcanzando en este caso, un alivio entre un 76 y un 78% aproximadamente, del esfuerzo del caso base. Sin embargo, los valores remanentes de esfuerzos no se condicen con los esperados según el gráfico presentado en la Figura 4, donde señala que habiendo transcurrido una hora de tratamiento a 600 [°C] el esfuerzo remanente no debería superar el 10% del inicial. Las razones de esta diferencia entre lo medido y lo esperado, pueden ser múltiples, como una mala ejecución del recocido, no alcanzando la temperatura necesaria y/o el tiempo de tratamiento adecuado o algún sesgo en las mediciones de los EE. RR.

Por otro lado, los cupones que presentaron porcentajes de esfuerzos remanentes mayores fueron el 2 y el 6. El porcentaje de esfuerzo aliviado no supero el 10%. Estos cupones fueron tratados en los dos niveles de amplitud, bajo y alto, controlado a través del voltaje, 100 y 200 [V] respectivamente, pero al mínimo tiempo de tratamiento, correspondiente a 10 minutos. El cupón 1, tratado con baja amplitud y 30 minutos, presenta un porcentaje remanente del 87,0%, claramente no lo hace el más alto, pero esto implica que su porcentaje de alivio fue del 13%, valor bajo,

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

comparativamente con el alivio presentado por el método convencional del recocido que se acerca a un 80%.

Finalmente, en un nivel intermedio está el cupón 7, que presenta un 45,9% de alivio de EE. RR. Este cupón fue vibrado durante 30 minutos con amplitud alta. Es el mejor resultado que presentó el método de vibración entre las 4 muestras. Resulta muy interesante obtener un alivio de esta magnitud en un periodo de 30 [min] a temperatura ambiente considerando que los tratamientos convencionales duran alrededor de 8 horas o más a altas temperaturas. Esto abre un nuevo nicho de investigación donde se puedan encontrar más y mejores antecedentes si se cambian algunas condiciones como son el tiempo y la temperatura a la cual se aplican las vibraciones.

Con los resultados descritos anteriormente, se observa que la combinación de tiempo de 30 minutos y un nivel de amplitud alto fue la que provocó el mayor porcentaje de relajación de los esfuerzos residuales (45,9%), con lo que se infiere que tanto el tiempo de tratamiento como el nivel de amplitud, son directamente proporcionales al alivio de tensiones, sin embargo, se debe tener en cuenta que pasado cierto nivel de amplitud, enlazado con la frecuencia (constante en esta investigación) los efectos pueden ser contrarios e incluso dañinos para la pieza tratada.

Respecto a la ubicación de los esfuerzos principales máximos, valores entregados en la Tabla 9, se obtuvo una banda de dirección esquematizada en la Figura 50. Estas direcciones se obtuvieron desde los datos y con las fórmulas presentadas en la sección 3.5 del presente informe. La banda de ángulos posibles para las direcciones de estos esfuerzos se debe a que no se midió en todos los cupones en el mismo lugar, es decir, hay mediciones hechas en el centro y otras más a la orilla de cada cupón, por lo que el efecto de los bordes de cada placa puede hacer variar las direcciones.

Cada ángulo es referenciado desde la posición de la galga 1, en dirección de la numeración de la roseta, si el ángulo es positivo y en dirección contraria a la

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

numeración de la roseta, si el ángulo es negativo. Para ambos casos, la banda comprende ángulos desde los -40° a -20° y de 20° a 40° .

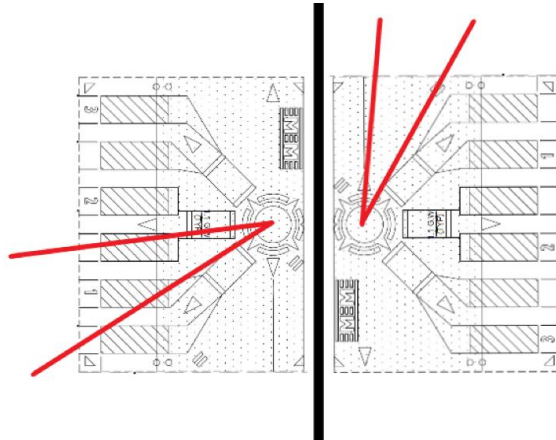


Figura 50. Esquema y banda de ángulos de dirección para ambos lados del cordón de soldadura (línea negra).

4.2. Condiciones Experimentales

En cuanto a las condiciones experimentales, se ha señalado que las variables de estudio modificadas fueron el tiempo de tratamiento y la amplitud, controlada a través de la diferencia de potencial que alimentaba al motor de masa excéntrica. Esto deja afuera la variación de la frecuencia, que en teoría es una de las variables más importantes del método vibratorio, es más, la selección de la frecuencia puede precisar un nulo, un óptimo o un destructivo resultado dependiendo si esta frecuencia está en la zona antes del armónico, zona sub armónica o frecuencia armónica (también conocida como resonancia), respectivamente.

La mesa vibratoria utilizada en este trabajo no daba la posibilidad de variar la frecuencia, ésta siempre se mantuvo en torno a los 50 [Hz]. Esto fue comprobado en un barrido de prueba realizado previo a la aplicación de vibraciones a los cupones 1, 2, 6 y 7, y además en el barrido, se observó que hubo dos niveles de amplitud, uno correspondiente a las mediciones realizadas con 50, 100 y 150 [V], nivel bajo, y otro con las mediciones a 200 y 220 [V], nivel alto. Esto llevó a pensar en la importancia de esta variable para los resultados, sabiendo por teoría que,

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

teniendo una frecuencia en la zona sub armónica los resultados son los mejores, cuál debiese ser una amplitud correcta. En esta misma línea, se plantearon interrogantes como, si logrando alcanzar frecuencias sub armónicas con un motor de vibración de un teléfono celular era posible aplicar el método de alivio de EE. RR. La respuesta es prácticamente obvia, no es posible. El motor de un celular no tiene la fuerza necesaria para generar una onda con la amplitud suficiente como para deformar localmente el material y generar un alivio de los esfuerzos.

Estos antecedentes, sumados al cálculo de las frecuencias de resonancia para una placa cuadrada de dimensiones iguales a la tratada, que da como resultado 80 [Hz] para una vibración libre (sin ningún lado empotrado) del primer modo, hace que los 50 [Hz] con los que vibra la mesa utilizada en los experimentos, hipotéticamente, ya que no se conoce el rango del armónico, esté dentro de la zona sub armónica, ideal para el tratamiento de alivio de esfuerzos. Y en cuanto a la amplitud, desde el barrido de prueba se obtienen factores que son directamente proporcionales a la amplitud del movimiento vibratorio, pero con los instrumentos presentes, no es posible calcular el valor preciso de la amplitud. Por lo que el análisis final del efecto de esta variable queda manifestado de forma cualitativa, a través del control del voltaje.

5. Conclusiones y Recomendaciones

Comparando valores de esfuerzo referenciales desde el caso base, el mayor alivio por vibraciones fue de 45,9% correspondiente al cupón 7, tratado durante 30 minutos a 200 [V]. Este resultado es de un nivel similar al obtenido por Walker et al.[11], donde los modos de introducir y medir los EE. RR. fueron diferentes al presentado en este trabajo. Los cupones tratados con menor tiempo no obtuvieron buenos resultados de alivio, por lo que 30 minutos parece ser un tiempo adecuado para este tipo de aplicación, bajo las condiciones estudiadas. Además, obtener una reducción cercana al 50% de los esfuerzos en este periodo es sumamente importante, considerando que los métodos térmicos demoran varias horas. En cuanto a la amplitud, controlada por el voltaje, bajo las condiciones de vibración libre, el nivel alto de amplitud dio los mejores resultados. En este caso, a mayor amplitud, existe un mayor alivio de tensiones residuales.

Para las piezas tratadas térmicamente, la relajación de tensiones fue de 76,3% y 78,5%. Ambos valores superiores a los mostrados por el método vibratorio, pero considerando tiempos y temperaturas ampliamente superiores a las del tratamiento vibracional, por lo que la recomendación es buscar lo requerimiento en cada situación, donde se debe entender que un alivio cercano al 50% en 30 [min] a temperatura ambiente, es un importante resultado que muestra el potencial de este método, con posibles mejoras en los resultados, controlando de mejor forma las variables del proceso, como lo son la frecuencia y amplitud, además de la posibilidad de realizar vibraciones a temperaturas elevadas que puedan mejorar su desempeño. También es necesario afinar el modo de medición, debido a la sensibilidad de los instrumentos de medición utilizados.

Las mediciones de dureza arrojaron un incremento local del esfuerzo de fluencia en la zona adjunta al cordón de soldadura. El esfuerzo de fluencia medido para el acero fue de 288 [MPa], y el calculado según norma ASTM A 370, puede alcanzar un valor de 300 [MPa]. Este incremento, por cierto, implica que el metal cercano al cordón de soldadura es más resistente que el metal base, sin embargo, no logra explicar el alto valor de los esfuerzos residuales.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Para una continuidad del estudio, se recomienda investigar algún equipo o procedimiento para medir la curva armónica producida por una carga vibratoria en piezas metálicas, con el fin de asegurar una aplicación de vibraciones en la zona sub armónica. Midiendo o conociendo la curva armónica, es posible conocer la amplitud de la vibración. Igualmente sería interesante conocer la carga necesaria para producir el alivio sin provocar un daño, por lo que un estudio complementario del estudio de propiedades mecánicas post vibraciones resulta necesario. Con todos estos extras, se podrá seleccionar una herramienta con las características necesarias (potencia, modo de vibración, frecuencia, etc.) para la generación de vibraciones que, por lo estudiado, generalmente será un motor de masa excéntrica. También se recomienda realizar estudios donde se expanda el rango de amplitud y el tiempo de los experimentos, al mismo tiempo combinar con temperaturas mayores y estudiar el efecto de estas condiciones más extremas sobre las propiedades mecánicas de la unión y realizar análisis estadísticos de estos datos.

El método de medición de EE. RR. utilizado en esta investigación posee un procedimiento claro, pero que requiere un cierto nivel de experiencia en la ejecución. La nivelación de superficies, la correcta instalación de las estampillas, la perforación en el centro geométrico de las galgas extensométricas, son algunos de los pasos muy sensibles a pequeños errores, advertidos por la norma, pero difíciles de controlar. A pesar de esto, el método del agujero ciego con rosetas se presenta como uno de los más confiables para medir esfuerzos en profundidad.

Finalmente, para la aplicación industrial en Manufacturas ECASO o cualquier otra empresa, es necesario tener un control de las variables de las vibraciones y así provocar un efecto no deseado o negativo en vez de un alivio de tensiones. En particular, ECASO, posee los medios técnicos y humanos para un correcto funcionamiento del método vibratorio, teniendo en cuenta los reales alcances de este. Sin embargo, a la falta de conocimiento sobre las consecuencias de aplicar las vibraciones, es recomendable no aplicarlas previo a un estudio particular de cada caso, considerando que muchas de las piezas que fabrican este tipo de

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

empresas son componentes estructurales y su falla es de importancia vital y de alta responsabilidad.

6. Referencias

- [1] ASM Internacional, ASM HANDBOOK Volumen 6 Welding, Brazing and Soldering, Estados Unidos, 1993, Vol 6.
- [2] R. D. Valladares Valdivieso, ALIVIO DE TENSIONES MEDIANTE VIBRACIONES SUBARMÓNICAS, (Ingeniero Mecánico), Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017.
- [3] R. Bustamante, MODELACION POR MEDIO DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LOS CAMPOS DE TEMPERATURA Y ESFUERZOS RESIDUALES EN UNIONES SOLDADAS, (Ingeniero Civil Mecánico), Valparaíso, UTFSM, 2003.
- [4] ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, BPVC 1995, Estados Unidos.
- [5] José María Rico Martínez, Fundamentos de Vibraciones Mecánicas. Definiciones y Terminología, [En línea] Guanajuato, Valle de Santiago, México, < docplayer.es/73626888-Fundamentos-de-vibraciones-mecanicas-definiciones-y-terminologia.html>, [Consulta: 20 de enero 2019].
- [6] I. S. Rebollar, Vibraciones Mecánicas, [En línea]. <<https://www.monografias.com/trabajos81/vibraciones-mecanicas/vibraciones-mecanicas3.shtml>>, [Consulta: 27 de diciembre de 2018].
- [7] J. Garcia Jacobiano, Tensiones Residuales en la Soldadura. Métodos para su Atenuación, < <https://www.monografias.com/trabajos36/tensiones-residuales/tensiones-residuales2.shtml>>, [Consulta: 26 de Octubre de 2018]
- [8] G. Garcia Rodero, Alivio de Tensiones Residuales: Tratamientos Térmicos vs Vibración, (Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación), Navarra, Universidad Pública de Navarra, 2004.
- [9] Stress Relief Engineering Company, Resonant Vibration Method For Reducing Residual Stresses in Welded or Machined Fabrications, [En línea], < <http://www.formula62.com>> [Consulta: Junio 2017].
- [10] Bonal Technologies Inc., META-LAX, [En línea]. < <http://www.meta-lax.com/>> [Consulta: Junio 2017].
- [11] C. A. Walker, A.J. Waddell, D. J. Johnston, Vibratory stress relief – An investigation of the underlying processes, University of Strathclyde, Glasgow, Escocia, 1994.
- [12] A. Viksne, Residual Stress Measurement of 7050 Aluminum Alloy, California Polytechnic State University, California, 2013.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

- [13] M. A. S. Alvarez, Determinación de los esfuerzos residuales mediante la constante acústico-elástica en aceros cementados 4320 y soldados por el proceso GMAW, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Saltillo, México, 2014.
- [14] Vishay Presicion Group, Measurement of Residual Stresses - Tech Note TN-503,[En línea], < www.vishaypg.com/docs/11053/tn503.pdf>, [Consulta: Junio 2017].
- [15] P. Mendez, Process Efficiencies, [Diapositivas], Alberta, Canadá, 2015.
- [16] ASTM International, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM E 837-2008, West Conshohocken, Estados Unidos.
- [17] Aceros Otero, [En línea]. < http://www.acerosotero.cl/acero_carbono_sae_1020.html> [Consulta: Julio 2017].
- [18] P. Mendez, Energy Balance in Arc Welding, [Diapositivas], Alberta, Canada, 2017.
- [19] M. Edwards, J. Donoso y S. Estay, Estudio de vida residual de rodetes Pelton, En: CONAMET/SAM (2008), Valparaíso, 2006.

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

7. Anexos

Tabla 10. Datos de la segunda medición del cupón 1.

Cupón 1.2	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-94	-57	-112	-9,40E-05	-5,70E-05	-1,12E-04
0,50	-190	-104	-217	-1,90E-04	-1,04E-04	-2,17E-04
0,75	-315	-153	-375	-3,15E-04	-1,53E-04	-3,75E-04
1,00	-357	-163	-418	-3,57E-04	-1,63E-04	-4,18E-04
1,25	-398	-170	-465	-3,98E-04	-1,70E-04	-4,65E-04
1,50	-426	-174	-497	-4,26E-04	-1,74E-04	-4,97E-04
1,75	-426	-165	-505	-4,26E-04	-1,65E-04	-5,05E-04
2,00	-429	-160	-510	-4,29E-04	-1,60E-04	-5,10E-04

Tabla 11. Datos de la primera medición del cupón 2.

Cupón 2.1	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-214	-91	-131	-2,14E-04	-9,10E-05	-1,31E-04
0,50	-367	-145	-233	-3,67E-04	-1,45E-04	-2,33E-04
0,75	-422	-151	-285	-4,22E-04	-1,51E-04	-2,85E-04
1,00	-453	-142	-320	-4,53E-04	-1,42E-04	-3,20E-04
1,25	-478	-136	-348	-4,78E-04	-1,36E-04	-3,48E-04
1,50	-486	-129	-363	-4,86E-04	-1,29E-04	-3,63E-04
1,75	-491	-123	-372	-4,91E-04	-1,23E-04	-3,72E-04
2,00	-489	-118	-375	-4,89E-04	-1,18E-04	-3,75E-04

Tabla 12. Datos de la segunda medición del cupón 2.

Cupón 2.2	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	30	-43	4	3,00E-05	-4,30E-05	4,00E-06
0,50	32	-44	9	3,20E-05	-4,40E-05	9,00E-06
0,75	32	-45	13	3,20E-05	-4,50E-05	1,30E-05
1,00	37	-43	20	3,70E-05	-4,30E-05	2,00E-05
1,25	28	-48	18	2,80E-05	-4,80E-05	1,80E-05
1,50	30	-44	33	3,00E-05	-4,40E-05	3,30E-05
1,75	27	-46	37	2,70E-05	-4,60E-05	3,70E-05
2,00	14	-61	26	1,40E-05	-6,10E-05	2,60E-05

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 13. Datos de la primera medición del cupón 3.

Cupón 3.1	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-116	-86	-207	-1,16E-04	-8,60E-05	-2,07E-04
0,50	-216	-149	-273	-2,16E-04	-1,49E-04	-2,73E-04
0,75	-288	-196	-370	-2,88E-04	-1,96E-04	-3,70E-04
1,00	-367	-231	-459	-3,67E-04	-2,31E-04	-4,59E-04
1,25	-455	-253	-568	-4,55E-04	-2,53E-04	-5,68E-04
1,50	-458	-255	-591	-4,58E-04	-2,55E-04	-5,91E-04
1,75	-470	-255	-605	-4,70E-04	-2,55E-04	-6,05E-04
2,00	-477	-256	-615	-4,77E-04	-2,56E-04	-6,15E-04

Tabla 14. Datos de la segunda medición del cupón 3.

Cupón 3.2	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-220	-63	-190	-2,20E-04	-6,30E-05	-1,90E-04
0,50	-325	-84	-223	-3,25E-04	-8,40E-05	-2,23E-04
0,75	-397	-89	-248	-3,97E-04	-8,90E-05	-2,48E-04
1,00	-456	-87	-263	-4,56E-04	-8,70E-05	-2,63E-04
1,25	-495	-81	-277	-4,95E-04	-8,10E-05	-2,77E-04
1,50	-517	-73	-285	-5,17E-04	-7,30E-05	-2,85E-04
1,75	-533	-63	-287	-5,33E-04	-6,30E-05	-2,87E-04
2,00	-541	-52	-284	-5,41E-04	-5,20E-05	-2,84E-04

Tabla 15. Datos de la primera medición del cupón 4.

Cupón 4.1	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-34	-42	-57	-3,40E-05	-4,20E-05	-5,70E-05
0,50	-63	-83	-109	-6,30E-05	-8,30E-05	-1,09E-04
0,75	-90	-103	-137	-9,00E-05	-1,03E-04	-1,37E-04
1,00	-102	-115	-153	-1,02E-04	-1,15E-04	-1,53E-04
1,25	-116	-124	-163	-1,16E-04	-1,24E-04	-1,63E-04
1,50	-126	-129	-167	-1,26E-04	-1,29E-04	-1,67E-04
1,75	-129	-132	-169	-1,29E-04	-1,32E-04	-1,69E-04
2,00	-429	-160	-510	-4,29E-04	-1,60E-04	-5,10E-04

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 16. Datos de la segunda medición del cupón 4.

Cupón 4.2	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-61	-31	-29	-6,10E-05	-3,10E-05	-2,90E-05
0,50	-91	-55	-48	-9,10E-05	-5,50E-05	-4,80E-05
0,75	-125	-77	-70	-1,25E-04	-7,70E-05	-7,00E-05
1,00	-127	-83	-79	-1,27E-04	-8,30E-05	-7,90E-05
1,25	-133	-93	-91	-1,33E-04	-9,30E-05	-9,10E-05
1,50	-139	-104	-104	-1,39E-04	-1,04E-04	-1,04E-04
1,75	-147	-110	-106	-1,47E-04	-1,10E-04	-1,06E-04
2,00	-149	-115	-113	-1,49E-04	-1,15E-04	-1,13E-04

Tabla 17. Datos de la primera medición del cupón 5.

Cupón 5.1	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-36	-23	-31	-3,60E-05	-2,30E-05	-3,10E-05
0,50	-70	-49	-62	-7,00E-05	-4,90E-05	-6,20E-05
0,75	-85	-54	-68	-8,50E-05	-5,40E-05	-6,80E-05
1,00	-84	-52	-72	-8,40E-05	-5,20E-05	-7,20E-05
1,25	-103	-65	-86	-1,03E-04	-6,50E-05	-8,60E-05
1,50	-102	-63	-88	-1,02E-04	-6,30E-05	-8,80E-05
1,75	-112	-72	-98	-1,12E-04	-7,20E-05	-9,80E-05
2,00	-112	-72	-99	-1,12E-04	-7,20E-05	-9,90E-05

Tabla 18. Datos de la segunda medición del cupón 5.

Cupón 5.2	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-42	-43	-45	-4,20E-05	-4,30E-05	-4,50E-05
0,50	-57	-53	-62	-5,70E-05	-5,30E-05	-6,20E-05
0,75	-90	-87	-119	-9,00E-05	-8,70E-05	-1,19E-04
1,00	-111	-106	-137	-1,11E-04	-1,06E-04	-1,37E-04
1,25	-111	-103	-141	-1,11E-04	-1,03E-04	-1,41E-04
1,50	-121	-111	-152	-1,21E-04	-1,11E-04	-1,52E-04
1,75	-124	-114	-157	-1,24E-04	-1,14E-04	-1,57E-04
2,00	-126	-116	-158	-1,26E-04	-1,16E-04	-1,58E-04

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 19. Datos de la primera medición del cupón 6.

Cupón 6.1	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-221	-184	-245	-2,21E-04	-1,84E-04	-2,45E-04
0,50	-303	-240	-318	-3,03E-04	-2,40E-04	-3,18E-04
0,75	-355	-285	-391	-3,55E-04	-2,85E-04	-3,91E-04
1,00	-395	-313	-443	-3,95E-04	-3,13E-04	-4,43E-04
1,25	-419	-327	-477	-4,19E-04	-3,27E-04	-4,77E-04
1,50	-426	-327	-498	-4,26E-04	-3,27E-04	-4,98E-04
1,75	-428	-324	-507	-4,28E-04	-3,24E-04	-5,07E-04
2,00	-426	-316	-514	-4,26E-04	-3,16E-04	-5,14E-04

Tabla 20. Datos de la segunda medición del cupón 6.

Cupón 6.2	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-207	-42	-120	-2,07E-04	-4,20E-05	-1,20E-04
0,50	-276	-42	-151	-2,76E-04	-4,20E-05	-1,51E-04
0,75	-370	-33	-200	-3,70E-04	-3,30E-05	-2,00E-04
1,00	-441	-30	-255	-4,41E-04	-3,00E-05	-2,55E-04
1,25	-451	-19	-259	-4,51E-04	-1,90E-05	-2,59E-04
1,50	-469	-6	-270	-4,69E-04	-6,00E-06	-2,70E-04
1,75	-472	2	-270	-4,72E-04	2,00E-06	-2,70E-04
2,00	-473	10	-269	-4,73E-04	1,00E-05	-2,69E-04

Tabla 21. Datos de la primera medición del cupón 7.

Cupón 7.1	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	-49	-15	-81	-4,90E-05	-1,50E-05	-8,10E-05
0,50	-99	-35	-157	-9,90E-05	-3,50E-05	-1,57E-04
0,75	-131	-36	-227	-1,31E-04	-3,60E-05	-2,27E-04
1,00	-141	-31	-252	-1,41E-04	-3,10E-05	-2,52E-04
1,25	-147	-23	-280	-1,47E-04	-2,30E-05	-2,80E-04
1,50	-149	-17	-295	-1,49E-04	-1,70E-05	-2,95E-04
1,75	-147	-10	-303	-1,47E-04	-1,00E-05	-3,03E-04
2,00	-144	-2	-310	-1,44E-04	-2,00E-06	-3,10E-04

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 22. Datos de la segunda medición del cupón 7.

Cupón 7.2	Datos en micro-deformación			Datos en deformación		
Profundidad	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	0	0	0	0	0	0
0,25	28	32	185	2,80E-05	3,20E-05	1,85E-04
0,50	24	36	199	2,40E-05	3,60E-05	1,99E-04
0,75	23	30	196	2,30E-05	3,00E-05	1,96E-04
1,00	22	28	200	2,20E-05	2,80E-05	2,00E-04
1,25	23	28	206	2,30E-05	2,80E-05	2,06E-04
1,50	21	25	206	2,10E-05	2,50E-05	2,06E-04
1,75	22	25	212	2,20E-05	2,50E-05	2,12E-04
2,00	22	23	213	2,20E-05	2,30E-05	2,13E-04

Tabla 23. Valores de constante a, según razón de profundidad/D y Do/D.

a	Do/D										
Profun/ D	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40
0	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,00 0
0,05	0,02 9	0,03 1	0,03 3	0,03 5	0,03 7	0,03 9	0,04 2	0,04 5	0,04 7	0,05 0	0,05 3
0,1	0,06 3	0,06 8	0,07 3	0,07 7	0,08 2	0,08 7	0,09 3	0,09 9	0,10 4	0,11 0	0,11 6
0,15	0,09 0	0,09 7	0,10 3	0,11 0	0,11 6	0,12 3	0,13 1	0,13 9	0,14 6	0,15 4	0,16 2
0,2	0,10 7	0,11 5	0,12 2	0,13 0	0,13 7	0,14 5	0,15 4	0,16 3	0,17 1	0,18 0	0,18 9
0,25	0,11 6	0,12 4	0,13 2	0,14 0	0,14 8	0,15 6	0,16 5	0,17 4	0,18 4	0,19 3	0,20 2
0,3	0,12 0	0,12 8	0,13 6	0,14 4	0,15 2	0,16 0	0,16 9	0,17 8	0,18 8	0,19 7	0,20 6
0,35	0,12 0	0,12 8	0,13 6	0,14 4	0,15 2	0,16 0	0,16 9	0,17 8	0,18 8	0,19 7	0,20 6
0,4	0,11 8	0,12 6	0,13 4	0,14 2	0,15 0	0,15 8	0,16 7	0,17 6	0,18 5	0,19 4	0,20 3

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 24. Valores de constante b, según razón de profundidad/D y Do/D.

b	Do/D											
	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,058	0,062	0,066	0,070	0,074	0,078	0,083	0,088	0,092	0,097	0,102	0,102
0,1	0,134	0,143	0,152	0,161	0,170	0,179	0,189	0,200	0,210	0,221	0,231	0,231
0,15	0,203	0,216	0,229	0,243	0,256	0,269	0,284	0,299	0,313	0,328	0,343	0,343
0,2	0,256	0,272	0,288	0,304	0,320	0,336	0,353	0,371	0,388	0,406	0,423	0,423
0,25	0,292	0,310	0,328	0,345	0,363	0,381	0,400	0,419	0,438	0,457	0,476	0,476
0,3	0,315	0,334	0,353	0,372	0,391	0,410	0,430	0,450	0,469	0,489	0,509	0,509
0,35	0,330	0,349	0,369	0,388	0,408	0,427	0,447	0,468	0,488	0,509	0,529	0,529
0,4	0,337	0,357	0,377	0,397	0,417	0,437	0,458	0,479	0,499	0,520	0,541	0,541

Tabla 25. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 1, medición 2, Do/D = 0,37.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t
0	0	0	0	0	0
0,25	-1,03,E-04	-9,00,E-06	-4,60,E-05	21,94	14,86
0,50	-2,04,E-04	-1,35,E-05	-9,95,E-05	43,34	32,15
0,75	-3,45,E-04	-3,00,E-05	-1,92,E-04	73,48	62,04
1,00	-3,88,E-04	-3,05,E-05	-2,25,E-04	82,53	72,54
1,25	-4,32,E-04	-3,35,E-05	-2,62,E-04	91,91	84,49
1,50	-4,62,E-04	-3,55,E-05	-2,88,E-04	98,30	92,89
1,75	-4,66,E-04	-3,95,E-05	-3,01,E-04	99,15	97,09
2,00	-4,70,E-04	-4,05,E-05	-3,10,E-04	100,00	100,00

Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,045	0,088	1,99,E-03	7,67,E-03	-4,59,E-06	-7,88,E-07	-4,03,E-06
0,50	0,099	0,200	9,72,E-03	3,99,E-02	-2,01,E-05	-2,70,E-06	-1,99,E-05
0,75	0,139	0,299	1,92,E-02	8,92,E-02	-4,78,E-05	-8,96,E-06	-5,73,E-05
1,00	0,163	0,371	2,64,E-02	1,37,E-01	-6,30,E-05	-1,13,E-05	-8,32,E-05
1,25	0,174	0,419	3,04,E-02	1,76,E-01	-7,53,E-05	-1,40,E-05	-1,10,E-04
1,50	0,178	0,450	3,18,E-02	2,02,E-01	-8,23,E-05	-1,60,E-05	-1,29,E-04
1,75	0,178	0,468	3,18,E-02	2,19,E-01	-8,30,E-05	-1,85,E-05	-1,41,E-04
2,00	0,176	0,479	3,10,E-02	2,29,E-01	-8,26,E-05	-1,94,E-05	-1,48,E-04

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 26. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 2, medición 1, Do/D = 0,36.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t		
0	0	0	0	0	0		
0,25	-1,73,E-04	4,15,E-05	-8,15,E-05	39,93	25,96		
0,50	-3,00,E-04	6,70,E-05	-1,55,E-04	69,44	49,36		
0,75	-3,54,E-04	6,85,E-05	-2,03,E-04	81,83	64,49		
1,00	-3,87,E-04	6,65,E-05	-2,45,E-04	89,47	77,87		
1,25	-4,13,E-04	6,50,E-05	-2,77,E-04	95,60	88,22		
1,50	-4,25,E-04	6,15,E-05	-2,96,E-04	98,26	94,11		
1,75	-4,32,E-04	5,95,E-05	-3,09,E-04	99,88	98,25		
2,00	-4,32,E-04	5,70,E-05	-3,14,E-04	100,00	100,00		
Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,042	0,083	1,75,E-03	6,86,E-03	-7,21,E-06	3,44,E-06	-6,75,E-06
0,50	0,093	0,189	8,61,E-03	3,59,E-02	-2,78,E-05	1,27,E-05	-2,94,E-05
0,75	0,131	0,284	1,71,E-02	8,05,E-02	-4,62,E-05	1,94,E-05	-5,75,E-05
1,00	0,154	0,353	2,37,E-02	1,25,E-01	-5,94,E-05	2,35,E-05	-8,64,E-05
1,25	0,165	0,400	2,73,E-02	1,60,E-01	-6,82,E-05	2,60,E-05	-1,11,E-04
1,50	0,169	0,430	2,86,E-02	1,85,E-01	-7,18,E-05	2,64,E-05	-1,27,E-04
1,75	0,169	0,447	2,86,E-02	2,00,E-01	-7,30,E-05	2,66,E-05	-1,38,E-04
2,00	0,167	0,458	2,79,E-02	2,10,E-01	-7,21,E-05	2,61,E-05	-1,44,E-04

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 27. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 3, medición 1, Do/D = 0,37.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t		
0	0	0	0	0	0		
0,25	-1,61,E-04	-4,57,E-05	-7,53,E-05	29,54	25,96		
0,50	-2,45,E-04	-2,85,E-05	-9,55,E-05	44,77	32,91		
0,75	-3,29,E-04	-4,10,E-05	-1,33,E-04	60,24	45,95		
1,00	-4,13,E-04	-4,60,E-05	-1,82,E-04	75,62	62,72		
1,25	-5,11,E-04	-5,63,E-05	-2,58,E-04	93,62	89,03		
1,50	-5,25,E-04	-6,65,E-05	-2,70,E-04	96,03	92,88		
1,75	-5,38,E-04	-6,75,E-05	-2,83,E-04	98,41	97,36		
2,00	-5,46,E-04	-6,88,E-05	-2,90,E-04	100,00	100,00		
Profundidad	a	b	a^2	b^2	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,045	0,088	1,99,E-03	7,67,E-03	-7,20,E-06	-4,00,E-06	-6,60,E-06
0,50	0,099	0,200	9,72,E-03	3,99,E-02	-2,41,E-05	-5,69,E-06	-1,91,E-05
0,75	0,139	0,299	1,92,E-02	8,92,E-02	-4,56,E-05	-1,22,E-05	-3,98,E-05
1,00	0,163	0,371	2,64,E-02	1,37,E-01	-6,72,E-05	-1,71,E-05	-6,75,E-05
1,25	0,174	0,419	3,04,E-02	1,76,E-01	-8,92,E-05	-2,36,E-05	-1,08,E-04
1,50	0,178	0,450	3,18,E-02	2,02,E-01	-9,36,E-05	-2,99,E-05	-1,21,E-04
1,75	0,178	0,468	3,18,E-02	2,19,E-01	-9,59,E-05	-3,16,E-05	-1,32,E-04
2,00	0,176	0,479	3,10,E-02	2,29,E-01	-9,61,E-05	-3,29,E-05	-1,39,E-04

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 28. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 3, medición 2, Do/D = 0,37.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t		
0	0	0	0	0	0		
0,25	-2,05,E-04	1,50,E-05	-1,42,E-04	49,70	39,39		
0,50	-2,74,E-04	5,10,E-05	-1,90,E-04	66,42	52,70		
0,75	-3,23,E-04	7,45,E-05	-2,34,E-04	78,18	64,77		
1,00	-3,60,E-04	9,65,E-05	-2,73,E-04	87,15	75,59		
1,25	-3,86,E-04	1,09,E-04	-3,05,E-04	93,58	84,60		
1,50	-4,01,E-04	1,16,E-04	-3,28,E-04	97,21	90,98		
1,75	-4,10,E-04	1,23,E-04	-3,47,E-04	99,39	96,26		
2,00	-4,13,E-04	1,29,E-04	-3,61,E-04	100,00	100,00		
Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,045	0,088	1,99,E-03	7,67,E-03	-9,14,E-06	1,31,E-06	-1,24,E-05
0,50	0,099	0,200	9,72,E-03	3,99,E-02	-2,70,E-05	1,02,E-05	-3,80,E-05
0,75	0,139	0,299	1,92,E-02	8,92,E-02	-4,47,E-05	2,22,E-05	-6,97,E-05
1,00	0,163	0,371	2,64,E-02	1,37,E-01	-5,85,E-05	3,58,E-05	-1,01,E-04
1,25	0,174	0,419	3,04,E-02	1,76,E-01	-6,73,E-05	4,57,E-05	-1,28,E-04
1,50	0,178	0,450	3,18,E-02	2,02,E-01	-7,15,E-05	5,22,E-05	-1,47,E-04
1,75	0,178	0,468	3,18,E-02	2,19,E-01	-7,31,E-05	5,75,E-05	-1,62,E-04
2,00	0,176	0,479	3,10,E-02	2,29,E-01	-7,26,E-05	6,15,E-05	-1,73,E-04

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 29. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 4, medición 1, Do/D = 0,39.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t		
0	0	0	0	0	0		
0,25	-4,55,E-05	-1,15,E-05	-3,50,E-06	30,54	18,42		
0,50	-8,60,E-05	-2,30,E-05	-3,00,E-06	57,72	15,79		
0,75	-1,14,E-04	-2,35,E-05	-1,05,E-05	76,17	55,26		
1,00	-1,28,E-04	-2,55,E-05	-1,25,E-05	85,57	65,79		
1,25	-1,40,E-04	-2,35,E-05	-1,55,E-05	93,62	81,58		
1,50	-1,47,E-04	-2,05,E-05	-1,75,E-05	98,32	92,11		
1,75	-1,49,E-04	-2,00,E-05	-1,70,E-05	100,00	89,47		
2,00	-1,49,E-04	-2,00,E-05	-1,90,E-05	100,00	100,00		
Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,050	0,097	2,52,E-03	9,45,E-03	-2,28,E-06	-1,12,E-06	-3,40,E-07
0,50	0,110	0,221	1,21,E-02	4,87,E-02	-9,48,E-06	-5,07,E-06	-6,62,E-07
0,75	0,154	0,328	2,38,E-02	1,08,E-01	-1,75,E-05	-7,71,E-06	-3,45,E-06
1,00	0,180	0,406	3,25,E-02	1,65,E-01	-2,30,E-05	-1,03,E-05	-5,07,E-06
1,25	0,193	0,457	3,72,E-02	2,09,E-01	-2,69,E-05	-1,07,E-05	-7,08,E-06
1,50	0,197	0,489	3,87,E-02	2,39,E-01	-2,88,E-05	-1,00,E-05	-8,56,E-06
1,75	0,197	0,509	3,87,E-02	2,59,E-01	-2,93,E-05	-1,02,E-05	-8,65,E-06
2,00	0,194	0,520	3,76,E-02	2,71,E-01	-2,89,E-05	-1,04,E-05	-9,88,E-06

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 30. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 5, medición 1, Do/D = 0,36.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t		
0	0	0	0	0	0		
0,25	-3,35,E-05	2,50,E-06	-1,05,E-05	31,75	31,34		
0,50	-6,60,E-05	4,00,E-06	-1,70,E-05	62,56	50,75		
0,75	-7,65,E-05	8,50,E-06	-2,25,E-05	72,51	67,16		
1,00	-7,80,E-05	6,00,E-06	-2,60,E-05	73,93	77,61		
1,25	-9,45,E-05	8,50,E-06	-2,95,E-05	89,57	88,06		
1,50	-9,50,E-05	7,00,E-06	-3,20,E-05	90,05	95,52		
1,75	-1,05,E-04	7,00,E-06	-3,30,E-05	99,53	98,51		
2,00	-1,06,E-04	6,50,E-06	-3,35,E-05	100,00	100,00		
Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,042	0,083	1,75,E-03	6,86,E-03	-1,40,E-06	2,07,E-07	-8,69,E-07
0,50	0,093	0,189	8,61,E-03	3,59,E-02	-6,12,E-06	7,58,E-07	-3,22,E-06
0,75	0,131	0,284	1,71,E-02	8,05,E-02	-1,00,E-05	2,41,E-06	-6,39,E-06
1,00	0,154	0,353	2,37,E-02	1,25,E-01	-1,20,E-05	2,12,E-06	-9,19,E-06
1,25	0,165	0,400	2,73,E-02	1,60,E-01	-1,56,E-05	3,40,E-06	-1,18,E-05
1,50	0,169	0,430	2,86,E-02	1,85,E-01	-1,61,E-05	3,01,E-06	-1,38,E-05
1,75	0,169	0,447	2,86,E-02	2,00,E-01	-1,78,E-05	3,13,E-06	-1,48,E-05
2,00	0,167	0,458	2,79,E-02	2,10,E-01	-1,76,E-05	2,98,E-06	-1,53,E-05

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 31. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 5, medición 2, Do/D = 0,38.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t		
0	0	0	0	0	0		
0,25	-4,35,E-05	-1,50,E-06	-5,00,E-07	30,63	1,92		
0,50	-5,95,E-05	-2,50,E-06	-6,50,E-06	41,90	25,00		
0,75	-1,05,E-04	-1,45,E-05	-1,75,E-05	73,59	67,31		
1,00	-1,24,E-04	-1,30,E-05	-1,80,E-05	87,32	69,23		
1,25	-1,26,E-04	-1,50,E-05	-2,30,E-05	88,73	88,46		
1,50	-1,37,E-04	-1,55,E-05	-2,55,E-05	96,13	98,08		
1,75	-1,41,E-04	-1,65,E-05	-2,65,E-05	98,94	101,92		
2,00	-1,42,E-04	-1,60,E-05	-2,60,E-05	100,00	100,00		
Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,047	0,092	2,25,E-03	8,54,E-03	-2,06,E-06	-1,39,E-07	-4,62,E-08
0,50	0,104	0,210	1,09,E-02	4,42,E-02	-6,21,E-06	-5,26,E-07	-1,37,E-06
0,75	0,146	0,313	2,14,E-02	9,82,E-02	-1,53,E-05	-4,54,E-06	-5,48,E-06
1,00	0,171	0,388	2,94,E-02	1,51,E-01	-2,13,E-05	-5,05,E-06	-6,99,E-06
1,25	0,184	0,438	3,37,E-02	1,92,E-01	-2,31,E-05	-6,57,E-06	-1,01,E-05
1,50	0,188	0,469	3,52,E-02	2,20,E-01	-2,56,E-05	-7,28,E-06	-1,20,E-05
1,75	0,188	0,488	3,52,E-02	2,38,E-01	-2,64,E-05	-8,06,E-06	-1,29,E-05
2,00	0,185	0,499	3,42,E-02	2,49,E-01	-2,63,E-05	-7,99,E-06	-1,30,E-05

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 32. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 6, medición 1, Do/D = 0,36.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t		
0	0	0	0	0	0		
0,25	-2,33,E-04	-1,20,E-05	-4,90,E-05	49,57	31,82		
0,50	-3,11,E-04	-7,50,E-06	-7,05,E-05	66,06	45,78		
0,75	-3,73,E-04	-1,80,E-05	-8,80,E-05	79,36	57,14		
1,00	-4,19,E-04	-2,40,E-05	-1,06,E-04	89,15	68,83		
1,25	-4,48,E-04	-2,90,E-05	-1,21,E-04	95,32	78,57		
1,50	-4,62,E-04	-3,60,E-05	-1,35,E-04	98,30	87,66		
1,75	-4,68,E-04	-3,95,E-05	-1,44,E-04	99,47	93,18		
2,00	-4,70,E-04	-4,40,E-05	-1,54,E-04	100,00	100,00		
Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,042	0,083	1,75,E-03	6,86,E-03	-9,74,E-06	-9,94,E-07	-4,06,E-06
0,50	0,093	0,189	8,61,E-03	3,59,E-02	-2,88,E-05	-1,42,E-06	-1,34,E-05
0,75	0,131	0,284	1,71,E-02	8,05,E-02	-4,88,E-05	-5,11,E-06	-2,50,E-05
1,00	0,154	0,353	2,37,E-02	1,25,E-01	-6,44,E-05	-8,48,E-06	-3,75,E-05
1,25	0,165	0,400	2,73,E-02	1,60,E-01	-7,40,E-05	-1,16,E-05	-4,84,E-05
1,50	0,169	0,430	2,86,E-02	1,85,E-01	-7,82,E-05	-1,55,E-05	-5,80,E-05
1,75	0,169	0,447	2,86,E-02	2,00,E-01	-7,91,E-05	-1,77,E-05	-6,42,E-05
2,00	0,167	0,458	2,79,E-02	2,10,E-01	-7,85,E-05	-2,01,E-05	-7,05,E-05

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A
TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 33. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 6, medición 2, Do/D = 0,38.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t		
0	0	0	0	0	0		
0,25	-1,64,E-04	4,35,E-05	-1,22,E-04	44,07	31,89		
0,50	-2,14,E-04	6,25,E-05	-1,72,E-04	57,55	45,01		
0,75	-2,85,E-04	8,50,E-05	-2,52,E-04	76,82	66,14		
1,00	-3,48,E-04	9,30,E-05	-3,18,E-04	93,80	83,46		
1,25	-3,55,E-04	9,60,E-05	-3,36,E-04	95,69	88,19		
1,50	-3,70,E-04	9,95,E-05	-3,64,E-04	99,60	95,41		
1,75	-3,71,E-04	1,01,E-04	-3,73,E-04	100,00	97,90		
2,00	-3,71,E-04	1,02,E-04	-3,81,E-04	100,00	100,00		
Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,047	0,092	2,25,E-03	8,54,E-03	-7,75,E-06	4,02,E-06	-1,12,E-05
0,50	0,104	0,210	1,09,E-02	4,42,E-02	-2,23,E-05	1,31,E-05	-3,60,E-05
0,75	0,146	0,313	2,14,E-02	9,82,E-02	-4,17,E-05	2,66,E-05	-7,90,E-05
1,00	0,171	0,388	2,94,E-02	1,51,E-01	-5,96,E-05	3,61,E-05	-1,23,E-04
1,25	0,184	0,438	3,37,E-02	1,92,E-01	-6,52,E-05	4,20,E-05	-1,47,E-04
1,50	0,188	0,469	3,52,E-02	2,20,E-01	-6,93,E-05	4,67,E-05	-1,71,E-04
1,75	0,188	0,488	3,52,E-02	2,38,E-01	-6,96,E-05	4,93,E-05	-1,82,E-04
2,00	0,185	0,499	3,42,E-02	2,49,E-01	-6,86,E-05	5,09,E-05	-1,90,E-04

ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES ORIGINADOS EN PROCESOS DE SOLDADURA A TRAVÉS DE VIBRACIONES.

Tabla 34. Datos para cálculos de esfuerzo. Cupón 7, medición 1, Do/D = 0,37.

Profundidad	p	q	t	%p	%q o %t		
0	0	0	0	0	0		
0,25	-6,50,E-05	-1,60,E-05	-5,00,E-05	28,63	22,22		
0,50	-1,28,E-04	-2,90,E-05	-9,30,E-05	56,39	41,33		
0,75	-1,79,E-04	-4,80,E-05	-1,43,E-04	78,85	63,56		
1,00	-1,97,E-04	-5,55,E-05	-1,66,E-04	86,56	73,56		
1,25	-2,14,E-04	-6,65,E-05	-1,91,E-04	94,05	84,67		
1,50	-2,22,E-04	-7,30,E-05	-2,05,E-04	97,80	91,11		
1,75	-2,25,E-04	-7,80,E-05	-2,15,E-04	99,12	95,56		
2,00	-2,27,E-04	-8,30,E-05	-2,25,E-04	100,00	100,00		
Profundidad	a	b	a ²	b ²	a*p	b*q	b*t
0	0,000	0,000	0	0	0	0	0
0,25	0,045	0,088	1,99,E-03	7,67,E-03	-2,90,E-06	-1,40,E-06	-4,38,E-06
0,50	0,099	0,200	9,72,E-03	3,99,E-02	-1,26,E-05	-5,79,E-06	-1,86,E-05
0,75	0,139	0,299	1,92,E-02	8,92,E-02	-2,48,E-05	-1,43,E-05	-4,27,E-05
1,00	0,163	0,371	2,64,E-02	1,37,E-01	-3,20,E-05	-2,06,E-05	-6,14,E-05
1,25	0,174	0,419	3,04,E-02	1,76,E-01	-3,72,E-05	-2,79,E-05	-7,98,E-05
1,50	0,178	0,450	3,18,E-02	2,02,E-01	-3,96,E-05	-3,28,E-05	-9,22,E-05
1,75	0,178	0,468	3,18,E-02	2,19,E-01	-4,01,E-05	-3,65,E-05	-1,01,E-04
2,00	0,176	0,479	3,10,E-02	2,29,E-01	-4,00,E-05	-3,97,E-05	-1,08,E-04

Tabla 35. Valores finales para cada medición. Esfuerzos en MPa, y ángulos en grados.

Cupón	P	Q	T	σ_x	σ_y	Txy	$\sigma_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{mín}}$	θ°
1.2	419165694	17492000	132130573	402	437	132	552	286	41
2.1	434030482	-34394423	146520891	468	400	147	585	284	-38
3.1	474055872	29980081	120941826	444	504	121	599	349	38
3.2	387338597	-54683299	158723849	442	333	159	555	219	-35
4.1	124109800	10532417	7016013	114	135	7	137	111	17
5.1	98432692	-37772861	15775000	102	95	16	115	82	-38
5.2	120456768	7016495	10809692	113	127	11	133	108	29
6.1	470323701	16942712	67226535	453	487	67	540	401	38
6.2	332990786	-46996173	164262792	380	286	164	504	162	-37
7.1	209435190	34178422	96857705	175	244	97	312	107	35