

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Sección Ingeniería Mecánica



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**ALIVIO DE TENSIONES MEDIANTE VIBRACIONES SUBARMÓNICAS
EN UNIONES SOLDADAS DE ACERO AL CARBONO**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO MECANICO** que presenta el bachiller:

Rolando Daniel Valladares Valdivieso

ASESOR: Dr. Francisco Rumiche Zapata

Lima, marzo de 2017

RESUMEN

Debido a los fenómenos térmicos que se generan durante el proceso de soldadura, las partes soldadas de acero, al enfriarse, generan esfuerzos internos de tracción o compresión que afectan sus dimensiones, sus propiedades mecánicas, e incluso forman fisuras que ponen en riesgo la vida útil de una estructura metálica, sobre todo cuando ésta se encuentra sometida a cargas cíclicas. El método utilizado con mayor frecuencia para mitigar dichos esfuerzos residuales es el tratamiento térmico de alivio de tensiones, sin embargo existen otros métodos mecánicos que persiguen el mismo efecto, algunos de los cuales se basan en la inducción de vibraciones mecánicas.

Esta investigación tiene por objeto medir la magnitud en la que se reducen los esfuerzos residuales post soldadura mediante el proceso de alivio de tensiones por vibraciones a frecuencias subarmónicas y contrastarla contra la reducción producida por efecto de la aplicación del tratamiento térmico de alivio de tensiones. El método utilizado en esta tesis para cuantificar la reducción en la magnitud de los esfuerzos residuales incluyó la medición de tensiones residuales mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX).

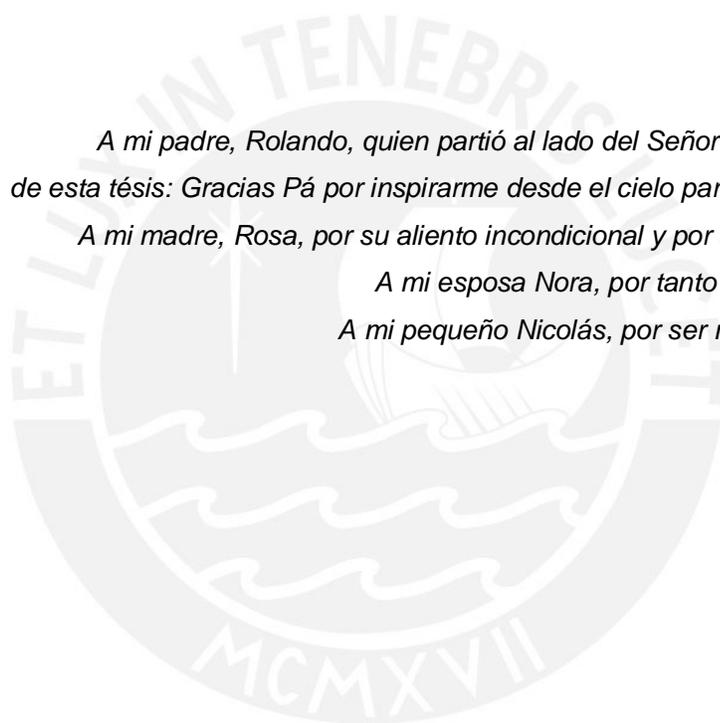
Las mediciones fueron realizadas en dos probetas idénticas sometidas al mismo proceso de soldadura en puntos cercanos a la unión soldada, y el resultado experimental reportó una reducción en la magnitud de los esfuerzos residuales longitudinales de tracción de hasta 85% en la probeta sometida al tratamiento térmico de alivio de tensiones; mientras que las mediciones fueron mixtas en el caso de la probeta sometida al proceso de alivio por vibraciones subarmónicas, pues en algunos puntos de ella no se reportaron reducciones significativas mientras que en otros se evidenció una reducción de esfuerzos residuales de hasta 45%.

A mi padre, Rolando, quien partió al lado del Señor durante la preparación de esta tesis: Gracias Pá por inspirarme desde el cielo para culminar esta misión.

A mi madre, Rosa, por su aliento incondicional y por ser mi ejemplo de vida.

A mi esposa Nora, por tanto amor y comprensión, y

A mi pequeño Nicolás, por ser mi alegría y motivación.



AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Dr. Francisco Rumiche por su apoyo incondicional y las palabras de aliento para culminar este estudio. A los Profesores Rolando Núñez, Paul Lean, y Víctor Girón por sus valiosos aportes.

A la empresa TAMA INGENIEROS S.A.C. en la persona del Ing. Elvis Cárdenas por facilitar los recursos materiales necesarios para el desarrollo de ésta investigación así como por el incentivar las actividades de investigación y desarrollo en la industria metalmecánica peruana.



CONTENIDO

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.....	1
1.1. Problema de Investigación.....	1
1.2. Formulación del Problema.....	2
1.3. Objetivos de la Investigación.....	2
1.4. Justificación de la Investigación.....	2
1.5. Limitaciones del Estudio.....	3
1.6. Viabilidad del Estudio.....	4
CAPÍTULO II. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA.....	5
2.1. Esfuerzos Residuales en Soldadura.....	5
2.2. Esfuerzos Residuales en Perfiles Laminados en Caliente.....	9
2.3. Fundamentos del Alivio de tensiones.....	10
2.4. Alivio de Tensiones Mediante Vibraciones.....	13
2.5. Alivio de Tensiones por Vibraciones Subarmónicas.....	13
2.5.1. Zona Subarmónica.....	14
2.5.2. El desplazamiento de la curva armónica debido a los esfuerzos residuales.....	22
2.6. El consumo de energía en hornos convencionales de tratamiento térmico.....	24
2.7. Técnicas utilizadas para la medición de esfuerzos residuales.....	25
2.7.1. Técnica del agujero ciego.....	26
2.7.2. Difracción de Rayos X.....	28
2.7.3. Técnica de ultrasonido para medición de esfuerzos residuales.....	32
2.7.4. Método de difracción de neutrones.....	33
2.8. Emisión de Gases de Efecto Invernadero.....	36
2.9. Resumen.....	37
CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	39
3.1. Características nominales del material base.....	40
3.2. Preparación de probetas.....	40
3.3. Características de las Uniones Soldadas.....	41
3.4. Registros de Trazabilidad del Proceso de Soldadura.....	43
3.5. Primera medición de esfuerzos residuales por difracción de Rayos X.....	44
3.6. Distribución de los Puntos de Medición de Esfuerzos Residuales.....	45
3.7. Electropolido de Probetas.....	46
3.8. Sistema de Alivio de Tensiones por Vibraciones Subarmónicas.....	47

3.9. Procedimiento de Alivio de Tensiones por Vibraciones Subarmónicas	48
3.10. Procedimiento de Alivio de Tensiones por Tratamiento Térmico.....	52
3.11. Segunda medición de esfuerzos residuales por difracción de Rayos X	52
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1. Análisis de Resultados	54
4.2. Cálculo de emisión de gases contaminantes	57
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
5.1. Conclusiones.....	58
5.2. Recomendaciones.....	59
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	63
ANEXOS	68

ANEXO A: Dossier de calidad de la Orden de Trabajo OT 042-13 del fabricante TAMA INGENIEROS S.A.C. elaborado para la evaluación del proceso de alivio de tensiones META-LAX:

- Plan de puntos de inspección T-AC-PPI
- Registro de procedimientos de soldadura (WPS) T-AC-RG-09
- Registro de calificación de procedimientos (PQR) T-AC-RG-10
- Registro de calificación de soldadores (WPQ) T-AC-RG-11
- Registro de recepción de materiales T-AC-RG-22
- Registro de recepción de materiales de aporte y consumibles T-AC-RG-23
- Registro del control dimensional T-AC-RG-08
- Registro de inspección de soldadura. T-AC-RG-12
- Registro de tintes penetrantes T-AC-RG-30
- Acta de liberación final T-AC-RG-21

ANEXO B: Reporte de medición de esfuerzos residuales *Standard Summary Report - Residual Stress* - N° 14004T emitido por Proto Manufacturing Inc.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Ejemplos de deformación por efecto de la soldadura.....	5
Figura 2:	Zonas afectadas por la soldadura y la distribución de temperaturas en una sección transversal.	6
Figura 3:	Efecto de una carga externa uniforme sobre la distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada a tope	8
Figura 4:	(a) Representación esquemática de una unión soldada a tope de una pasada; (b) Temperatura y, (c) Esfuerzos residuales.....	9
Figura 5:	Distribución de esfuerzos residuales en una unión a tope de una pasada.....	10
Figura 6:	Distribución de esfuerzo típicos en perfiles laminados en caliente.....	11
Figura 7:	Esquematización del proceso de alivio de tensiones mediante <i>Shot peening</i>	13
Figura 8:	Frecuencia vs. Disipación de energía mediante histéresis, por ciclo.....	15
Figura 9:	Comportamiento de materiales dúctiles en el Diagrama Esfuerzo-Deformación.	16
Figura 10:	Relación entre esfuerzo, deformación, y energía en el lazo de histéresis durante una carga cíclica.....	18
Figura 11:	Frecuencia versus disipación de energía de histéresis, por ciclo.....	19
Figura 12:	Modelo de viga vibratoria de Skinner (1987).....	22
Figura 13:	Comportamiento de la curva armónica antes y después del tratamiento bajo vibraciones subarmónicas.	24
Figura 14:	Tipos de sensores extensométricos.....	27
Figura 15:	Estado de los esfuerzos residuales en el punto P después de la introducción de un agujero.....	27
Figura 16:	Características básicas de un experimento de Difracción de Rayos X..	28
Figura 17:	Arreglo y orientación de planos para medición DRX.	30
Figura 18:	Representación esquemática del método de $\text{sen}2\psi$	30
Figura 19:	Orientación de los componentes de la deformación en esfuerzos planos.....	31
Figura 20:	Cambios en la velocidad de onda ultrasónica longitudinal (CL) y ondas de corte de polarización ortogonal (CSX3; CSX2) en función de la tensión mecánica.	33
Figura 21:	Medición de esfuerzos residuales por difracción de neutrones en la parte central de una pieza de aluminio fundido de uso aeroespacial.	35

Figura 22. Curvas de distribución de esfuerzos antes y después del proceso de vibración.....	36
Figura 23. Dimensiones y rotulado de probetas de acero ASTM A36 para ensayo DRX.....	40
Figura 24. Distribución de los puntos de medición de esfuerzos residuales sobre las probetas de acero ASTM A36 para ensayo DRX.	42
Figura 25. Parámetros utilizados para la soldadura de las probetas de acero de 9.5 mm de espesor.....	43
Figura 26. Probetas de acero de 9.5mm de espesor durante ensayos no destructivos.	43
Figura 27. Sistema de Alivio de Tensiones Residuales por Vibraciones: 1) Panel de control electrónico, 2) Acelerómetro, 3) Motor inductor de vibraciones.	48
Figura 28. Registro gráfico del traslado de curvas armónicas Antes del alivio; Durante el proceso, y después del proceso.....	50
Figura 29. Modelo para alivio de tensiones por vibraciones post-soldadura.....	51
Figura 30. Arreglo para alivio de tensiones en taller el 16 de mayo del 2014.....	51
Figura 31. Difractómetro de laboratorio LXRD 11999 con probeta 9AV2	45
Figura 32. Resultados de medición de esfuerzos residuales medidos sobre la superficie.....	46
Figura 33. Proceso de electropulido en Laboratorio.....	47
Figura 34. Detalle de zona electropulida en probetas (0.5mm profundidad).....	47
Figura 35. Reporte estándar de medición de esfuerzos residuales del Laboratorio Proto Mfg, Michigan, USA.....	53
Figura 36. Registro gráfico comparativo de Esfuerzo residual versus Distancia al centro de la soldadura: (a) Antes y después del tratamiento térmico (b) Antes y después del Alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas.	56
Figura 37 Valor comercial del Alivio de Tensiones (US\$/Kg).	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistencia Máxima a la Tracción Registrada.....	35
Tabla 2. Distribución de los puntos de medición de esfuerzos residuales.....	45
Tabla 3. Tiempos de proceso del alivio de tensiones para piezas de acero al carbono según fabricante.....	48
Tabla 4. Registro de mediciones de esfuerzos residuales para probetas de 9.5mm ⁵⁴	
Tabla 5. Consumo de GLP para Tratamiento Térmico.....	57
Tabla 6. Tabla Comparativa de Emisión de GEI.....	57



CAPÍTULO I. INTRODUCCION

Los materiales sometidos a cambios súbitos de temperatura albergan esfuerzos residuales lo cual sucede usualmente en el caso de piezas soldadas, forjadas, fundidas, mecanizadas, esmeriladas, o endurecidas. Estos esfuerzos residuales exponen al material a algunos problemas durante su procesamiento o, incluso, su puesta en servicio: distorsión dimensional después del mecanizado, esmerilado o tratamiento térmico, deformación posterior y fisuras prematuras.

Para reducir y eliminar estos problemas las piezas pueden ser sometidas al alivio de tensiones mediante métodos mecánicos o térmicos. Antes el método más común era el tratamiento térmico, pero el calor, a pesar de ser efectivo, tiene algunas desventajas como los elevados costos y tiempos de proceso, la alteración de las propiedades mecánicas, distorsión dimensional, oxidación superficial, y limitaciones de tipo logístico para ser aplicadas en piezas grandes y pesadas.

Otros métodos utilizados son el envejecimiento (que involucra un tiempo extenso), el tratamiento criogénico (caro y con limitaciones dimensionales), y el tratamiento mediante vibraciones. Cuando se utiliza el tratamiento por vibración se debe tener en cuenta que, al igual que el tratamiento térmico, se pueden alcanzar altos niveles de energía pero, tal como se verá en el Capítulo II, solo un rango pequeño de éstos producirá resultados efectivos en el alivio de tensiones.

1.1. Problema de Investigación

Las partes soldadas de acero, al enfriarse, generan tensiones internas de tracción o compresión que modifican su estructura cristalina y, por ende, sus propiedades mecánicas. Estas tensiones devienen en la generación de grietas y fisuras que ponen en riesgo la vida útil de una estructura metálica, efecto que se acentúa cuando la estructura se encuentra sometida a esfuerzos de fatiga. Los esfuerzos residuales pueden ser reducidos o eliminados por métodos térmicos o mecánicos. Durante el tratamiento térmico de alivio de tensiones la unión soldada es calentada hasta una temperatura a la que el punto de fluencia del material es lo suficientemente bajo para fluir plásticamente permitiendo así la relajación de los esfuerzos y como resultado del tratamiento térmico de alivio de tensiones, las propiedades mecánicas del material pueden verse alteradas (Connor, 1987). Por tanto es importante determinar la efectividad de los métodos mecánicos de alivio de tensiones como una alternativa al tratamiento térmico a fin de evitar la alteración de

las propiedades mecánicas y otras consecuencias que éste genera, sin embargo en el Perú aún no se han realizado estudios experimentales para afirmar que la aplicación de vibraciones mecánicas pueden ser consideradas una alternativa al tratamiento térmico de alivio de tensiones.

1.2. Formulación del Problema

¿El método de alivio de tensiones residuales por medio de vibraciones genera una reducción significativa de éstas en una unión soldada de acero al carbono?

1.3. Objetivos de la Investigación

Objetivo Principal: Validar si la metodología de alivio de tensiones residuales por medio de vibraciones subarmónicas genera una reducción significativa de estas y si dicha reducción es comparable con el efecto de la aplicación del tratamiento térmico de alivio de tensiones.

Objetivos específicos:

- a. Medir la efectividad de la aplicación de la metodología de alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas en la reducción de esfuerzos residuales en una unión soldada de acero al carbono.
- b. Medir la efectividad de la aplicación de la metodología de alivio de tensiones mediante tratamiento térmico en la reducción de esfuerzos residuales en una unión soldada de acero al carbono.
- c. Comparar cuantitativamente el efecto que ejerce el proceso de alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas con el efecto de la aplicación del tratamiento térmico de alivio de tensiones en las uniones soldadas de acero al carbono

1.4. Justificación de la Investigación

Se requiere establecer si el tratamiento térmico de alivio de tensiones mediante vibraciones mecánicas es una alternativa técnica y económicamente equiparable al tratamiento térmico de alivio de tensiones pues la principal desventaja de éste último radica en las demoras en los plazos de entrega por el tiempo que requiere el proceso, las distorsiones dimensionales post-calentamiento, la alteración de las propiedades mecánicas y la pérdida de rigidez de las estructuras (Claxton & Bentley, 1999) además del costo generado por la cantidad

de energía que demanda (Robbins, 2004), sin dejar de mencionar que genera efectos colaterales como contaminación ambiental y emisión de gases de efecto invernadero.

Hacia el cierre del año 2014 la Asociación de Empresas Privadas Metalmeccánicas del Perú estimaba que el sector mantendría un nivel de producción de 200,000 toneladas de acero (Palma, 2014), de los cuales más del 90% corresponde a estructuras metálicas que no requieren la aplicación del proceso de alivio de tensiones al cual está orientada ésta investigación. Por tanto se estima que la aplicación del método a estudiar tiene un potencial de mercado de 5,000 a 10,000 toneladas de estructuras metálicas de acero al año.

1.5. Limitaciones del Estudio

Entre las principales limitaciones que surgieron a lo largo de este estudio se tuvieron: (a) los recursos económicos disponibles, puesto que el financiamiento del mismo estuvo a cargo de una empresa metalmeccánica privada que, si bien tiene promueve las actividades de investigación y desarrollo de procesos de manufactura, contó con recursos limitados por los flujos de caja disponibles durante el periodo que duró la investigación, entre mayo del 2013 y julio del 2014; (b) la inexistencia de laboratorios locales que realicen medición y evaluación de esfuerzos residuales mediante difracción de rayos X, lo cual obligó a desarrollar parte de este estudio en un laboratorio extranjero pues se exploraron opciones de medición por DRX con los tres laboratorios con difractómetros existentes en la ciudad de Lima sin éxito: uno de ellos no prestaba servicios a empresas fuera del sector minero y los otros dos no realizaban DRX a placas rígidas; (c) el insuficiente estado del arte en materia de investigación en esfuerzos residuales en uniones soldadas de acero al carbono; (d) la falta de estandarización de procesos de alivio de tensiones: cada fabricante de sistemas de alivio de tensiones por vibraciones ha establecido su propio procedimiento lo cual restringió el alcance de ésta investigación a uno solo de los diferentes tipos de alivio de tensiones mediante vibraciones: el método subarmónico; (e) el elevado costo unitario del ensayo mediante difracción de rayos X en cada punto de medición sobre cada probeta evaluada, lo cual restringió el número de muestras ensayadas y la cantidad de puntos de medición principalmente por cuestiones presupuestales; (f) el método de difracción de rayos X permite evaluar los esfuerzos residuales a nivel superficial lo cual demanda un gran número de pruebas con remoción de material por electroerosionado a fin de realizar mediciones a diferentes niveles de profundidad; (g) las diferentes variables que

influyen en los niveles de esfuerzos residuales originados por la soldadura, dado que no todas ellas son controlables en la práctica y hacerlo implica un mayor número de muestras y, por ende, una mayor inversión de recursos, ensayos y tiempo.

Durante la revisión del estado de la tecnología se identificaron ocho variables influyentes en el proceso de alivio de tensiones residuales por vibraciones subarmónicas:

- a. Material Base
- b. Espesores de placa a soldar
- c. Frecuencia de vibración
- d. Tiempo de sometimiento bajo vibración
- e. Tipo de tratamiento de alivio de tensiones
- f. Método de soldadura utilizado
- g. Tipo de junta soldada (tope, filete)
- h. Contenido de Carbono

1.6. Viabilidad del Estudio

El desarrollo de éste estudio fue viable a nivel de experimento piloto. Para su escalamiento a nivel comercial será necesario realizar un mayor número de ensayos en similares puntos de medición e incorporando otras variables influyentes para lograr resultados estadísticamente significativos que validen su aplicación.

CAPÍTULO II. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

El proceso de soldadura por fusión es comúnmente usado desde la fabricación de grandes estructuras hasta elementos de máquina menores. Tal como detalla Robbins (2004), el problema en este proceso de manufactura es que el calor generado por la fusión genera el efecto negativo de formación de esfuerzos residuales en el metal, que causa la deformación de las piezas soldadas o la falla de la soldadura, que él representó gráficamente en la Figura 1.

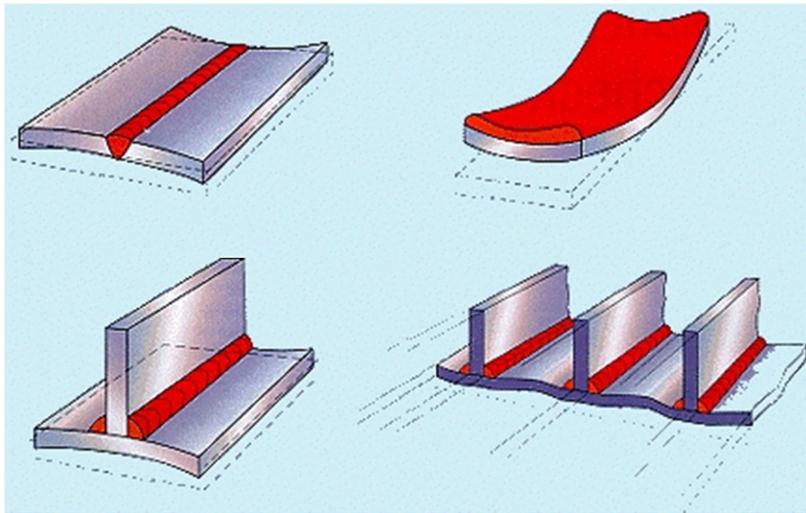


Figura 1: Ejemplos de deformación por efecto de la soldadura

Fuente: Robbins (2004, p.3)

2.1. Esfuerzos Residuales en Soldadura

Sin importar el método de soldadura utilizado, se introducen esfuerzos residuales dentro de la pieza soldada. Estos esfuerzos residuales son causados por el rápido calentamiento y enfriamiento del material cerca a la fuente de calor. Las temperaturas varían en función de la distancia hacia el punto de fusión, y de esta forma se distinguen tres zonas: (a) la fuente de calor, (b) la zona de fusión, (c) la zona afectada por el calor o ZAC. Tal como se aprecia en la Figura 2, primero se observa la zona de fusión (ZF) que es donde se encuentra el metal fundido. Desde el punto de vista metalúrgico en esta región ocurre un proceso de solidificación complejo con cambios en la microestructura que varía de acuerdo al modo de solidificación del metal. Adyacente a la zona de fusión está la zona afectada por el

calor (ZAC) en donde se aprecia el gradiente de temperatura y cuyo tamaño depende del aporte térmico de soldadura (Figura 2).

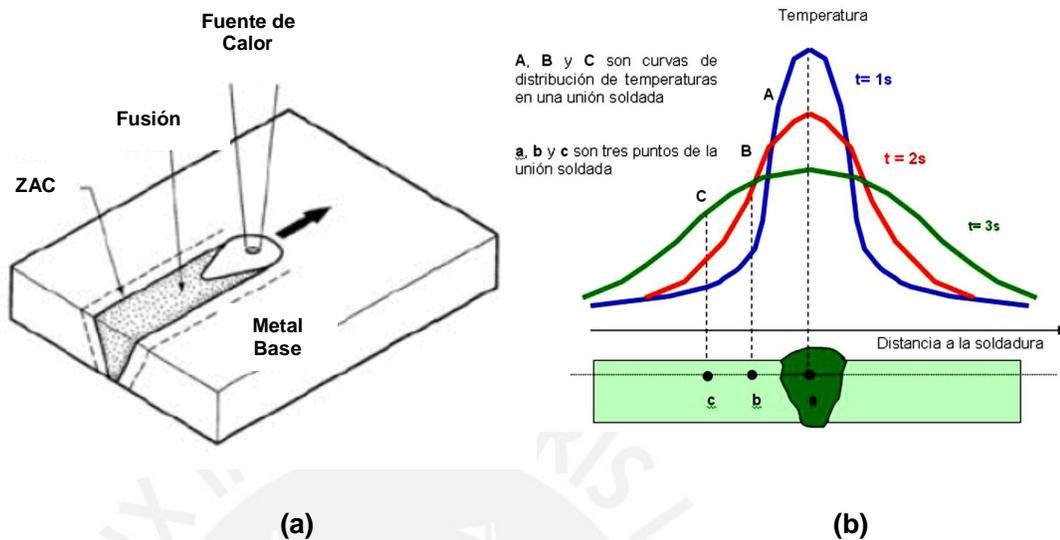


Figura 2: Zonas afectadas por la soldadura y la distribución de temperaturas en una sección transversal.

Fuentes: (a) Robbins (2004), y (b) Fosca, (2007) citado por Bullón, Valverde, Acosta, y Franco (2007).

En la ZAC se producen transformaciones metalúrgicas de estado sólido similares a las que ocurren en los tratamientos térmicos. La zona cercana a la fusión se caracteriza por una microestructura de granos gruesos que deterioran la tenacidad en esa región haciéndola más susceptible a la propagación de fisuras (Asta, 2006). Por su parte, la *American Welding Society* (1950) definió a la ZAC como “la porción del metal base que no ha sido fundida pero cuyas propiedades mecánicas o microestructuras han sido alteradas por el calor de la soldadura o el corte”.

Según Nitschke-Pagel (2002), los esfuerzos residuales de soldadura se deben a deformaciones plásticas y elásticas. Mientras el material es calentado y fundido localmente, trata de expandirse pero se encuentra restringido por el metal base frío que se encuentra alrededor de la zona calentada. Luego el área calentada se contrae tan rápido como se enfría, mientras que el metal base –más frío y rígido– permanece en su lugar generando esfuerzos de tensión, deformaciones microscópicas, esfuerzos transitorios, y cambios de fase que contribuyen a la creación de esfuerzos residuales.

La Figura 3 muestra el efecto de una soldadura a tope con una distribución de esfuerzos residuales originados por cargas externas. La curva A muestra la distribución de esfuerzos residuales en condición "Tal como se soldó". La curva B muestra la distribución de esfuerzos cuando el esfuerzo σ_1 es aplicado mientras que la curva E representa la distribución de esfuerzos después de que el esfuerzo σ_1 fue retirado. La curva C muestra el esfuerzo de tensión incrementado a un nivel σ_2 y la curva F es la distribución de esfuerzos después de que σ_2 fue liberado. La curva D muestra que, en condición de fluencia, la distribución de esfuerzos se aplanan y el efecto de los esfuerzos residuales disminuyen (Connor, 1987).

En la Figura 3 Connor (1987) muestra que los esfuerzos de tensión cerca al cordón de soldadura y parte de la ZAC se encuentran bajo tensión. Los esfuerzos residuales pueden ser perjudiciales o beneficiosos para una pieza. Los esfuerzos residuales de tensión contribuyen a generar fisuras en la ZAC durante el proceso de solidificación debido a las restricciones que ofrece el metal base a los esfuerzos térmicos de compresión generados (Lampman, 1997). Debido a ello es que reducen la vida útil de elementos soldados bajo fatiga haciéndolos fallar prematuramente. De otro lado, Robbins (2004) sostiene que algunas tensiones residuales son favorables pues los esfuerzos residuales de compresión incrementan la resistencia a la fatiga en las piezas soldadas.

En la Figura 4a la soldadura se muestra en área sombreada. La región de metal fundido está representada por el origen "O". La Figura 4b muestra los perfiles de temperatura variable a lo largo de diferentes secciones de la unión soldada, entre los cuales la sección B-B corta la fuente de metal líquido y la sección C-C está a una distancia cercana al punto de fusión dentro del metal solidificado.

La Figura 4c muestra los esfuerzos residuales como resultado de la soldadura. La sección A-A alejada del cordón de soldadura no muestra esfuerzos residuales. En la sección B-B existen esfuerzos térmicos pero cercanos a cero pues el metal fundido no tiene capacidad para soportar carga. En zonas lejanas al arco donde el enfriamiento tiene lugar los esfuerzos son mayores debido a la menor temperatura y a las restricciones de contracción.

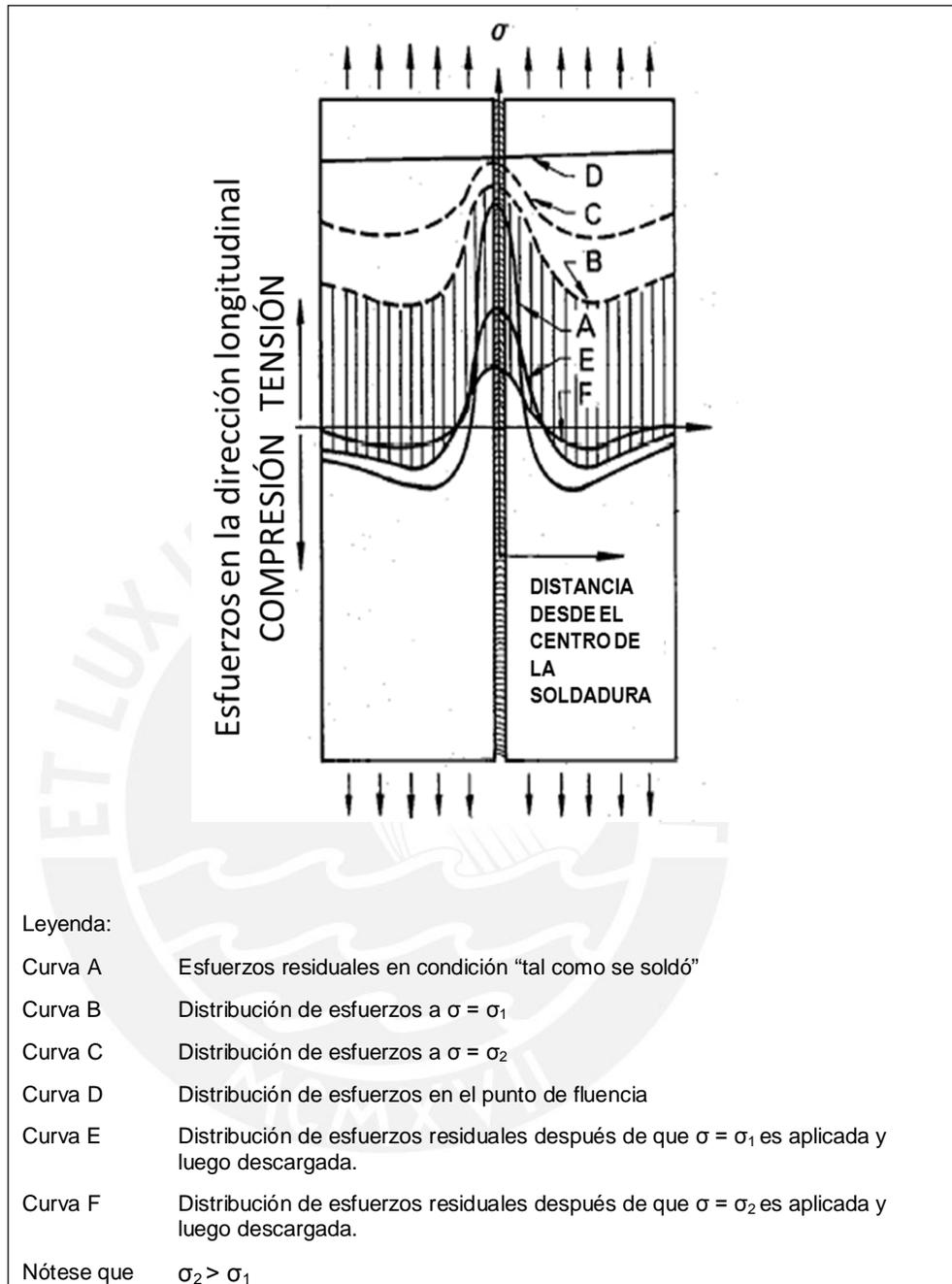


Figura 3: Efecto de una carga externa uniforme sobre la distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada a tope

Fuente: Connor (1987)

Las mayores magnitudes de esfuerzos de compresión y tracción suceden en la sección D-D donde los picos de tracción en el metal enfriado y los picos de compresión en el metal base alrededor.

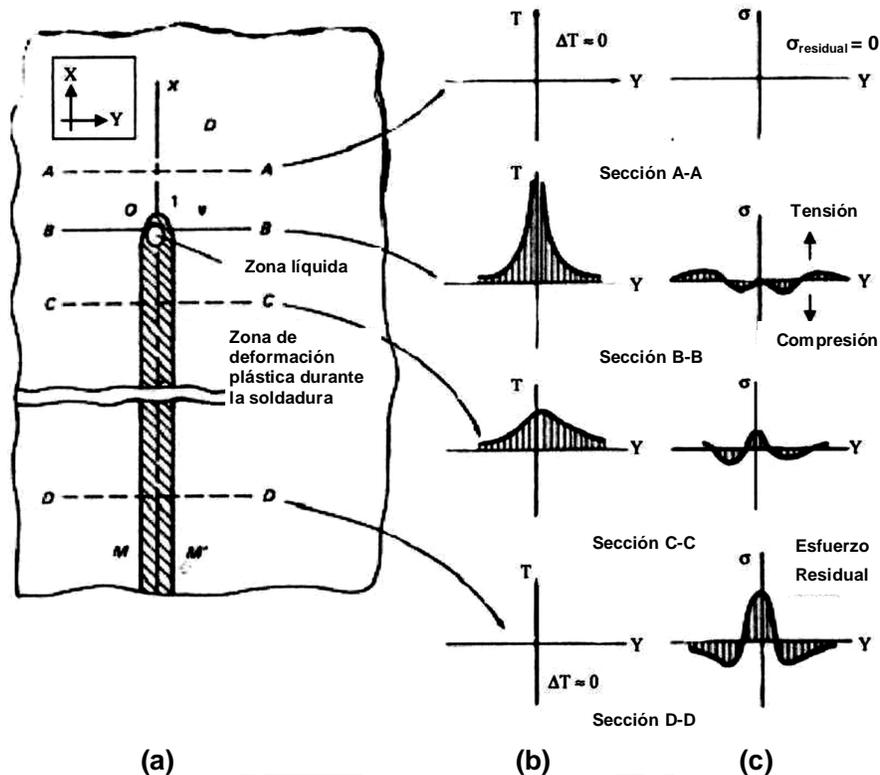


Figura 4: (a) Representación esquemática de una unión soldada a tope de una pasada; (b) Temperatura y, (c) Esfuerzos residuales.

Fuente: ASM Handbook (1983) en Hornsey (2006, p.3).

En la Figura 5, Hornsey (2006) detalla con mayor claridad cómo se distribuyen los esfuerzos residuales en una unión a tope de forma simétrica respecto al eje longitudinal del cordón de soldadura. Partiendo de este supuesto de simetría es que los ensayos de medición de esfuerzos residuales detallados en el Capítulo III se realizaron en una sola mitad de cada probeta soldada.

2.2. Esfuerzos Residuales en Perfiles Laminados en Caliente

A los esfuerzos que perduran incluso después del proceso de laminado en caliente de los perfiles de acero también se les denomina esfuerzos residuales (Brockenbrough, 2011) y su magnitud es conocida cortando secciones longitudinales y midiendo la deformación resultante. Por lo general solo se miden los esfuerzos longitudinales. Para alcanzar condiciones de equilibrio estático las fuerzas axiales y los momentos obtenidos por integración a lo largo de cualquier sección deben sumar cero. En un perfil laminado en caliente, los esfuerzos residuales resultan de enfriamientos no uniformes después del laminado.

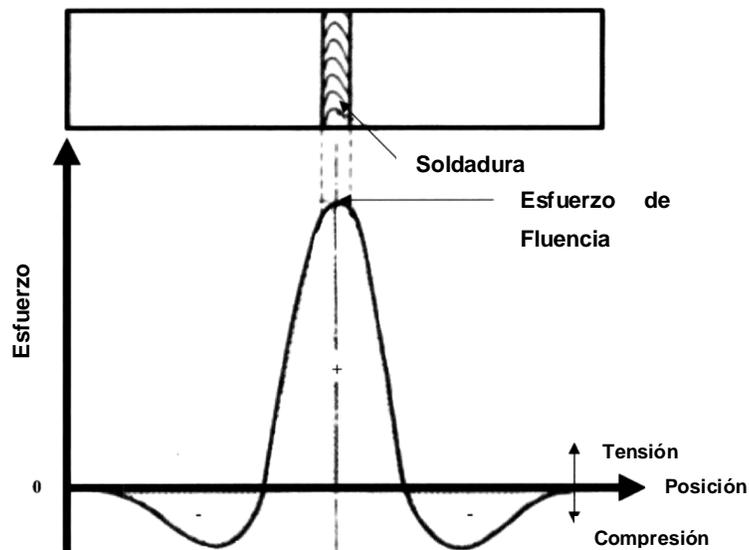


Figura 5: Distribución de esfuerzos longitudinales residuales en una unión a tope de una pasada.

Fuente: Lincoln Arc Welding (2004) en Hornsey (2006, p.4).

Por ejemplo, en una viga de ala ancha, el centro de la misma enfría más lentamente y desarrolla tensiones residuales que luego serán balanceadas por esfuerzos de compresión en el resto de la sección (Figura 6a). En una pieza soldada, los esfuerzos residuales de tensión tienen lugar cerca a la soldadura y los de compresión generan equilibrio en el resto de la sección tal como se muestra en la sección cuadrada de la Figura 6b. En el caso de planchas laminadas en caliente, los extremos están bajo esfuerzos de compresión (Figura 6c) sin embargo las planchas recortadas por flama están sometidas a esfuerzos residuales de tensión (Figura 6d). En el caso de una viga H fabricada de planchas soldadas, la condición de esfuerzos residuales en los extremos de las alas antes de la soldadura se refleja en los esfuerzos residuales finales de la Figura 6e. A pesar de que no se muestran en la Figura 6, los esfuerzos residuales en los extremos de las planchas de extremos cortados varían a lo largo del espesor de placa. Los esfuerzos de tensión están presentes en la superficie y los de compresión en la superficie opuesta.

2.3. Fundamentos del Alivio de tensiones

Existen dos formas para reducir o eliminar los esfuerzos residuales originados por la soldadura. Una es el tratamiento térmico post-soldadura (en inglés *post weld heat treatment*) y la otra está dada por los tratamientos mecánicos. Los factores que influyen en la generación de esfuerzos residuales son el tipo de

material, el aporte de calor, el flujo de transferencia de calor, el espesor del material, el tipo de soldadura, la sujeción del material, la velocidad del proceso, y otros (Robbins, 2004).

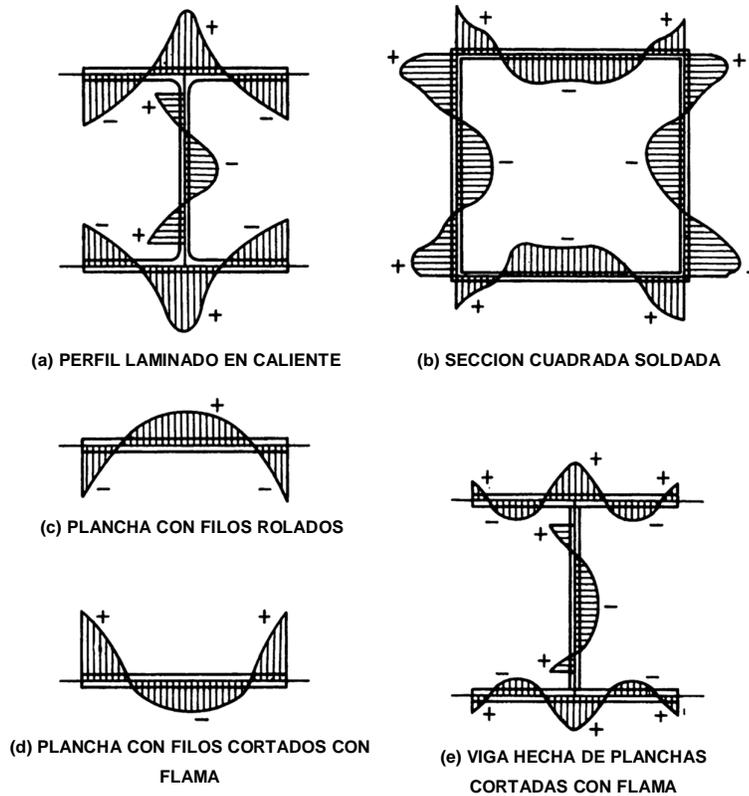


Figura 6: Distribución de esfuerzo típicos en perfiles laminados en caliente (+ indica tensión y – compresión).

Fuente: Brockenbrough (2011, p. 1.23)

El tratamiento térmico es el método tradicional para la reducción o alivio de tensiones residuales en las uniones soldadas. Las piezas son calentadas lentamente hasta temperaturas superiores a los 600°C y de forma controlada de manera que se evita la creación de nuevos esfuerzos residuales. La pieza luego es mantenida a esa temperatura por una cantidad de tiempo predeterminada (William & Callister, 2007). A esta temperatura el punto de fluencia del metal base de la soldadura es lo suficientemente bajo como para relajar plásticamente las zonas bajo tensión hasta llevarlo a un nuevo estado de tensiones menores. Como resultado del tratamiento térmico de alivio de tensiones, las propiedades mecánicas del material pueden verse alteradas (Connor, 1987).

La principal desventaja del tratamiento térmico de alivio de tensiones en hornos radica en el costo representado por el tiempo y la cantidad de energía que

demanda (Robbins, 2004), haciendo que las estructuras soldadas de grandes dimensiones requieran hornos de similar magnitud (los cuales son escasos en un medio como el peruano). Robbins (2004) también señala que existen estructuras que requieren de hasta 40 horas de proceso térmico para lograr reducir sus esfuerzos residuales hasta niveles aceptables. Del mismo modo, Claxton y Bentley (1999) sostienen que, además, surgen distorsiones dimensionales debidas al calentamiento así como la pérdida de rigidez de las estructuras e incorporan conceptos como contaminación y demoras en los tiempos de entrega. También es posible reducir los esfuerzos térmicos residuales de forma puntual utilizando el calentamiento por medio de una antorcha de acetileno, sin embargo es un proceso manual que suele consumir horas-hombre. El uso de mantas cerámicas portátiles para el tratamiento térmico post soldadura es cada vez más común, sin embargo pueden requerir de varias horas para la elevación y mantenimiento de la temperatura superiores a los 600°C dependiendo del contenido de aleantes del metal base. También existen equipos de tratamiento térmico por inducción de hasta 25 KW, controlados de forma digital, refrigerados por líquido, con aislamiento por mantas de Kevlar, que se pueden transportar con facilidad gracias a su tamaño y peso reducido (Hydratight Limited, 2016). Las ventajas del calentamiento por inducción incluyen una rápida instalación y un tratamiento térmico más rápido y con uso más eficiente de la energía que el tratamiento en hornos de combustión.

Respecto a los métodos mecánicos para reducir los esfuerzos residuales existen: (a) el *Shot peening* que consiste en un bombardeo de las piezas con esferas metálicas tipo pellet, las cuales impactan sobre la superficie creando leves indentaciones que introducen esfuerzos de compresión sobre la superficie que contrarrestan los esfuerzos de tensión en dicha superficie, evitando así que luego se generen fisuras e incrementando su resistencia a la falla por fatiga (ver Figura 7). Cullison (2001) recomienda controlar algunas variables importantes cuando se aplica esta técnica: los esfuerzos superficiales de compresión, el máximo esfuerzo de compresión, la profundidad de dichos esfuerzos y la velocidad de impacto ya que si esta última es elevada inducirá efectos nocivos para los efectos deseados.

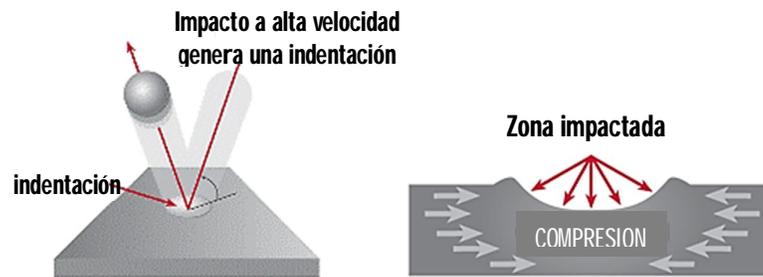


Figura 7: Esquemización del proceso de alivio de tensiones mediante *Shot peening*.

Fuente: *Metal Improvement Company* (2010)

2.4. Alivio de Tensiones Mediante Vibraciones

Claxton y Bentley (1989) sostienen que el mayor propósito del alivio de tensiones mediante vibraciones es reducir y redistribuir los esfuerzos residuales hacia niveles confiables de manera que se asegure la estabilidad permanente de la pieza y, de acuerdo al estado del arte, dicho propósito puede ser alcanzado mediante diferentes formas de vibración que difieren de acuerdo a la frecuencia y aceleración a las que son inducidas las vibraciones.

El alivio de tensiones mediante vibraciones resonantes induce cíclicamente esfuerzos de forma progresiva hasta llegar al pico de resonancia de la pieza, en el que dichos esfuerzos se superponen a los esfuerzos residuales facilitando la reducción de esfuerzos y la redistribución de los mismos logrando el mismo efecto que un tratamiento térmico. Claxton y Bentley (1989) manifiestan que someter a los elementos metálicos a un estado de resonancia no genera daños en ellos y que, además, se aplica antes del proceso de maquinado aunque puede ser aplicado después del maquinado cuando se desea aliviar esfuerzos propios del arranque de viruta. También se aplica antes del esmerilado final facilitando tolerancias de hasta una micra por metro.

2.5. Alivio de Tensiones por Vibraciones Subarmónicas

En este método de alivio de tensiones las piezas son sometidas a vibraciones con una frecuencia que se encuentra dentro de la zona subarmónica de la curva armónica del elemento sometido a vibración y se fundamenta en dos principios que serán profundizados en los siguientes apartados:

- a. La energía vibracional absorbida por un elemento llega a un punto máximo cuando éste es sometido a vibraciones de nivel subarmónico, es decir, por debajo de su frecuencia natural de resonancia.
- b. La curva armónica de una pieza con tensiones residuales será trasladada a una nueva frecuencia cuando dicha pieza es tratada mediante vibración.

De acuerdo con Hebel (1997) algunos de las ventajas de esta técnica son:

- Reduce las distorsiones dimensionales después del mecanizado.
- Reduce la posibilidad de generación de grietas prematuras.
- Puede ser utilizada durante el proceso de soldadura permitiendo reducir las deformaciones propias de ese proceso y una soldadura de grano más fino y aún más resistente a las fisuras.

2.5.1. Zona Subarmónica

Todos los cuerpos metálicos muestran una reacción armónica a una determinada frecuencia frente a una energía inducida. La curva armónica aparece cuando el componente excitado no puede disipar más energía del inductor de fuerza y responde con un movimiento de amplitud desproporcionada. Skinner (1987) estableció que la frecuencia óptima para el alivio de tensiones usando la energía vibratoria se encuentra en la zona subarmónica de la curva armónica del elemento sometido a vibración, en el tercio inicial de la curva armónica de ésta curva se encuentra la frecuencia óptima a ser aplicada para alcanzar la energía vibratoria que alivie las tensiones residuales.

En la Figura 8 se aprecia que cuando se induce una frecuencia dentro de la zona subarmónica se maximiza la absorción de energía para el alivio de tensiones tal como lo indica el área mayor dentro de la curva de histéresis. En la frecuencia correspondiente al pico armónico, la energía interna disipada cae a cero. Por tal razón Hebel (1997) advierte que la aplicación del tratamiento mediante vibraciones a frecuencias resonantes (o de pico armónico) puede dañar la estructura conduciendo al proceso a lograr resultados adversos a los deseados.

Posteriormente, y a través de estudios de vibraciones, se determinó que el nivel de energía subarmónica es el mismo nivel de energía que corresponde a la mayor cantidad de energía disipada por amortiguamiento (Harris, 1961). Cuando un material es sometido a una fuerza sinusoidal se da una respuesta de histéresis y el lazo de histéresis representa a la relación esfuerzo-deformación de una parte de la

fuerza de energía dinámica (Figura 8B). Nótese que esta es diferente a la línea recta generada en la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación en carga estática. Cuando la carga excéntrica del vibrador alcanza su límite superior y luego empieza a caer se inicia un segundo tramo, partido, como respuesta natural del cuerpo. Este retardo llega a un nivel máximo cerca del inicio de la curva armónica.

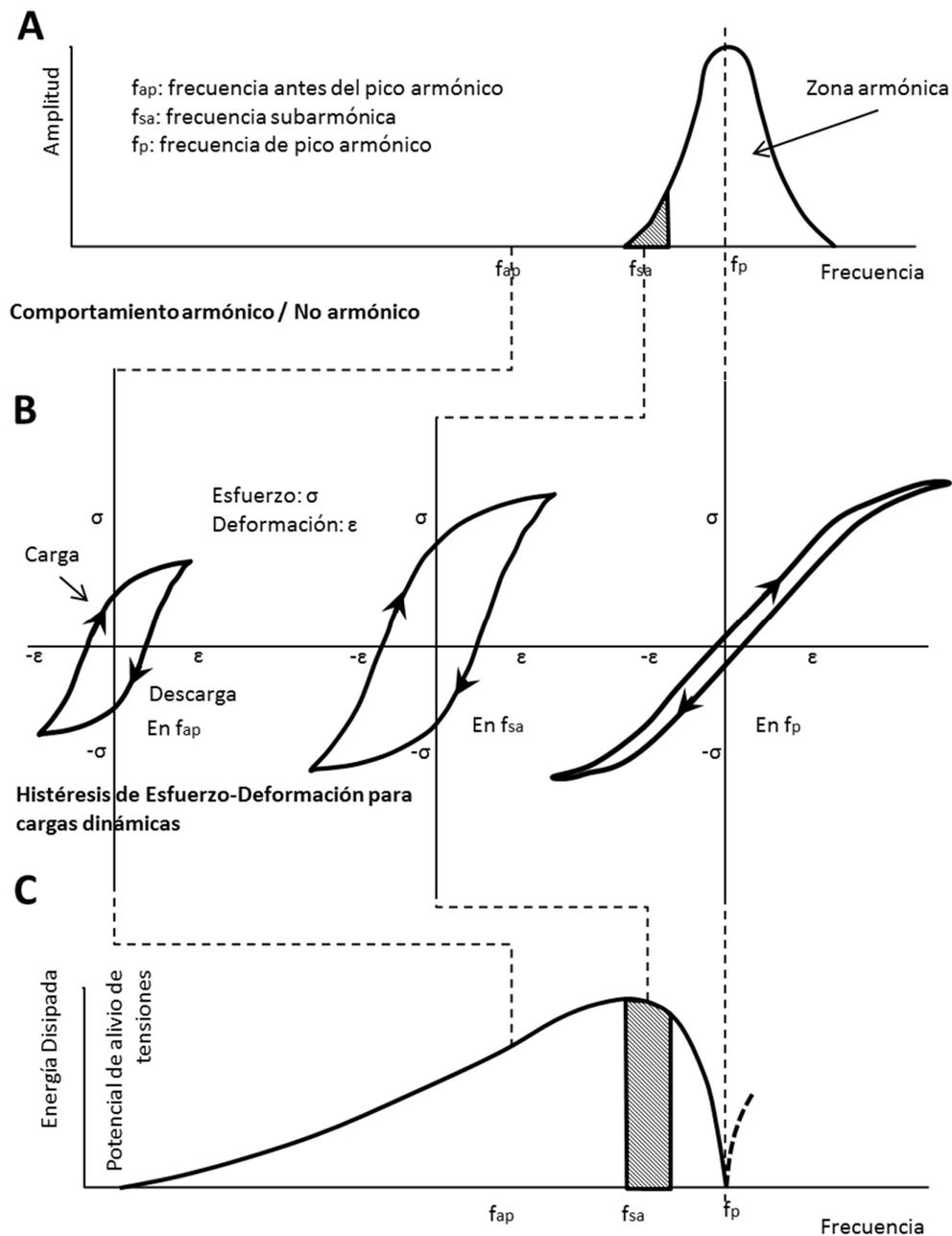


Figura 8: Frecuencia vs. Disipación de energía mediante histéresis, por ciclo.

Fuente: Hayden, Moffatt, y Wolff (1965)

El área dentro del lazo de histéresis es la energía de amortiguamiento disipada y llega a un máximo cerca del inicio de la curva armónica, zona que Hebel (1997) denomina *Zona Subarmónica*.

Si una probeta de material dúctil como el acero es cargada dentro de la zona plástica -y luego descargada- la deformación elástica se recupera cuando el material retorna a su estado de equilibrio, sin embargo la deformación plástica permanece y, en consecuencia, el material queda sujeto a una deformación permanente. Este comportamiento se ilustra en la Figura 9a. En ella, el espécimen se carga inicialmente más allá de su punto de fluencia A hasta el punto A'. Debido a que las fuerzas interatómicas tienen que vencerse para alargar al material elásticamente entonces esas mismas fuerzas hacen retroceder a los átomos cuando se retira la carga. Dado que el módulo de elasticidad E es el mismo la pendiente de la línea $O'A'$ tiene la misma pendiente que el tramo OA .

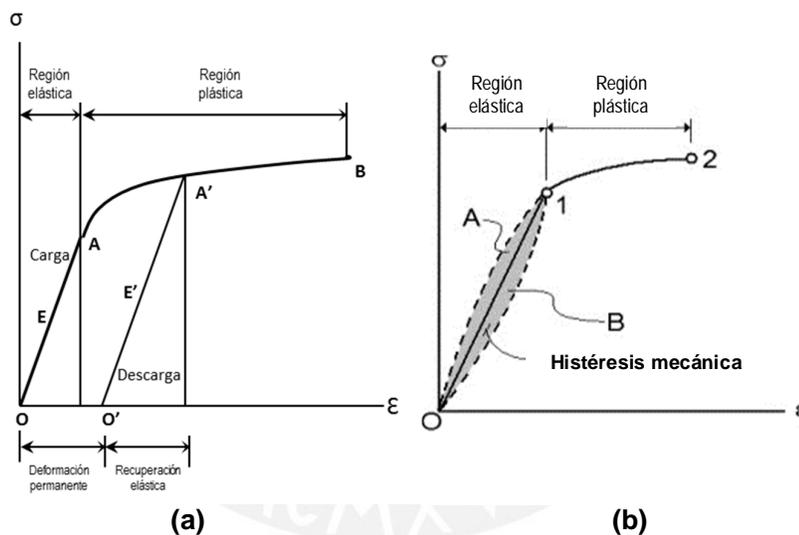


Figura 9: Comportamiento de materiales dúctiles en el Diagrama Esfuerzo-Deformación.

Fuente: Hibbeler (1999)

Quando se aplica la carga nuevamente, los átomos del material serán desplazados nuevamente hasta que ocurra la fluencia en -o cerca de- el esfuerzo A' y el diagrama esfuerzo-deformación continúa a lo largo de la misma trayectoria (Figura 9a). Sin embargo, resalta Hibbeler (1999), el nuevo diagrama esfuerzo-deformación definido por $O'A'B$ tiene un punto de fluencia mayor (A') como consecuencia del endurecimiento por deformación. Puede perderse algo de calor o energía cuando el material es descargado desde A' y luego se carga nuevamente

hasta el mismo nivel de esfuerzo. Como resultado se tendrán ligeras curvas en las direcciones A'O' y O'A' durante un ciclo de carga (líneas punteadas en la Figura 9b). El área contenida entre ambas curvas representa energía perdida y tiene el nombre de Histéresis mecánica y es relevante en temas de vibración y amortiguación estructural como los tratados en el presente estudio.

El lazo de histéresis resultante está dado por la relación esfuerzo deformación bajo el efecto de una fuente de energía dinámica. Este lazo será diferente a la línea recta generada en la zona elástica del diagrama esfuerzo deformación para una pieza sometida a una carga estática. Cuando la carga excéntrica del vibrador llega a su máximo y luego cae, la pieza responde haciendo que la curva de histéresis se quiebre e inicie un segundo lazo (de bajada). Este lazo alcanza un tamaño máximo cerca del pie de la curva armónica. El área sombreada dentro del lazo de histéresis es la energía disipada y alcanza un máximo –también– cerca del pie de la curva armónica, considerada la zona subarmónica. En consecuencia, Hebel (1997) afirma que el mayor nivel de disipación de energía es también su mayor potencial de alivio de tensiones.

Skinner (1987) demostró matemáticamente que cuando se aplican vibraciones a una frecuencia ligeramente menor que la frecuencia de pico armónico se puede lograr el efecto deseado de liberar las tensiones residuales existentes en las piezas y también señaló que dicho nivel varía ligeramente dependiendo de la resistencia del metal tratado bajo este procedimiento.

Cuando un elemento es esforzado rápidamente de manera que no tiene tiempo para equilibrarse con el medio que lo rodea, la deformación es adiabática (es decir, no hay transferencia de calor hacia dentro o desde fuera) y de entropía constante con una consecuente disminución de la temperatura. Luego de que el elemento es sometido a un esfuerzo σ la temperatura se eleva originando una deformación (ϵ) que expanda el elemento isotérmicamente hasta una magnitud igual a σ/E por la ley de Hooke. Tanto Hayden, *et al.* (1965) como Dieter (1986) establecen que en estos casos (cuando un material es deformado bajo entropía constante) el cambio de temperatura es igual a:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \epsilon} \right|_S = \frac{V_m \alpha E T}{C_V} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Dónde:

V_m : Volumen molar del material

- α : Coeficiente de expansión térmica
- E : Módulo de elasticidad isotérmico
- T : Temperatura absoluta
- C_v : Calor específico a volumen constante
- ϵ : Deformación

Y una descarga sobre el material sigue un camino de retorno similar hasta que $\sigma=0$ y $\epsilon=0$. Mientras la carga y descarga sea cíclica la curva se convierte en un lazo de histéresis. El área bajo la curva OA1 de la Figura 9b es la energía liberada durante la carga del ciclo y el área bajo la curva 1B0 representa a la energía durante la descarga y el área restante viene a ser la energía mecánica disipada durante el ciclo. La energía es convertida en energía térmica y liberada a través de los límites de grano hacia la superficie para llevar al elemento al equilibrio termodinámico. El ancho del lazo de histéresis equivale a $\epsilon_1 - \epsilon_a = \tau \dot{\epsilon}$.

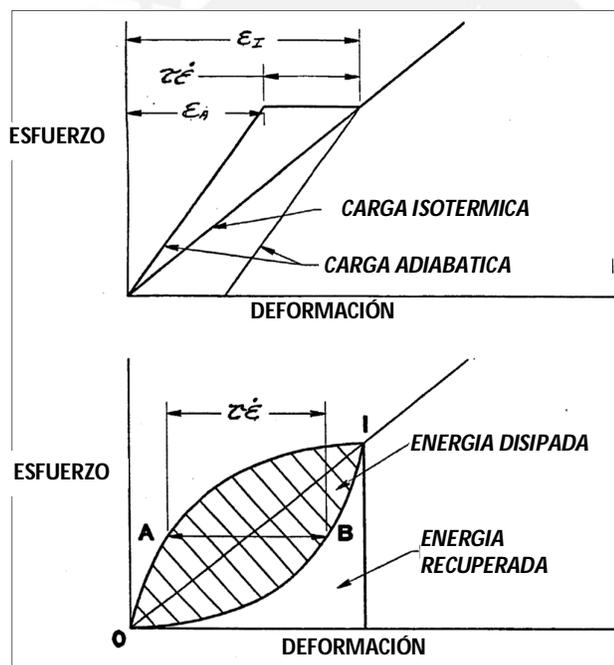


Figura 10: Relación entre esfuerzo, deformación, y energía en el lazo de histéresis durante una carga cíclica.

Fuente: Hayden *et al.* (1965) en Skinner (1987, p.5)

Este efecto termoelástico es resultado de la fricción interna que es principal mecanismo de disipación de energía convirtiendo la energía mecánica en térmica durante las vibraciones. Si el sistema es inelástico obedece a:

$$\sigma = E_A [\epsilon + \tau \dot{\epsilon}] \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde E_A es el módulo adiabático de elasticidad y τ el tiempo de relajación del material (Figura 10) y donde la fricción interna es independiente de la amplitud y la deformación está desfasada del esfuerzo en un ángulo ϕ .

Del mismo modo, Skinner (1987) establece que el lazo de histéresis es sensible a la frecuencia de vibración tal como se muestra en la Figura 11. Cuando la frecuencia es baja el elemento es cargado isotérmicamente tomando energía de sus alrededores para mantener su temperatura constante, y cuando la frecuencia es muy alta el material se deforma tan rápidamente que no tiene tiempo suficiente de relajación convirtiendo al proceso completamente adiabático. En ambos casos el lazo de histéresis es tan pequeño que se disipa muy poca o nada energía. En un rango intermedio de frecuencias (según Skinner entre 10 y 200Hz) el incremento del área dentro del lazo es significativo y crece hasta un punto máximo en donde la energía disipada es también máxima. Esta frecuencia se ubica cerca de la frecuencia de resonancia del material bajo condiciones de esfuerzo y deformación.

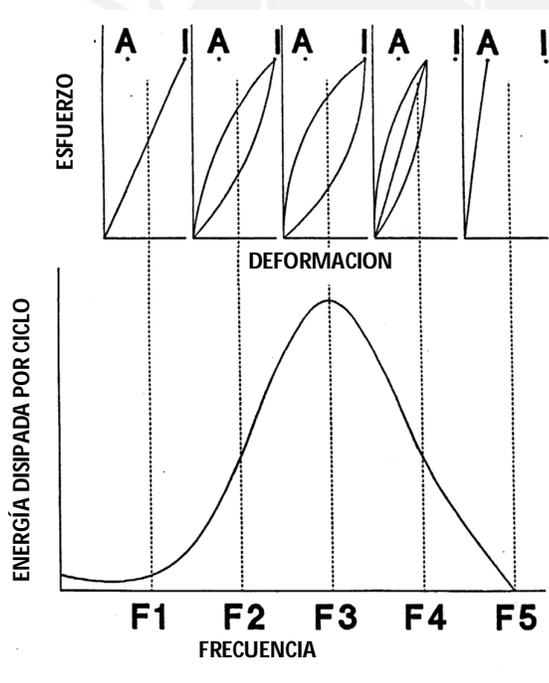


Figura 11: Frecuencia versus disipación de energía de histéresis, por ciclo

Fuente: Hayden *et al.* (1965) en Skinner (1987, p.7)

De otro lado, el efecto del tamaño de grano se puede apreciar en la Ecuación 3:

$$\partial = \frac{1}{Q} = \pi\phi = \frac{u}{\Delta u} = \frac{f_2 - f_1}{f_r} = \frac{E_A - E_I}{2[E_A E_I]^{1/2}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Dónde:

$\frac{\Delta u}{u}$: Ratio de energía disipada por ciclo sobre total de energía almacenada por ciclo.

$\frac{f_2 - f_1}{f_r}$: Frecuencia a niveles de amplitud $\frac{1}{\sqrt{2}} A_{m2} - \frac{1}{\sqrt{2}} A_{m1}$ dividida entre la frecuencia de resonancia.

Φ : Angulo al cual está retrasada la deformación respecto al esfuerzo mientras recorre el lazo de histéresis. Para valores pequeños $\Phi \approx \sin \Phi$.

δ : Capacidad de amortiguamiento del material.

El ángulo de fase Φ está relacionado al componente de deformación plástica $\tau \dot{\epsilon}$ (detallado en la $\sigma = E_A [\epsilon + \tau \dot{\epsilon}]$ Ecuación (2). Y debido a que éste componente depende del coeficiente de expansión térmica α entonces es una propiedad de cada material. Hayden *et al.* (1965) y Dieter (1988) sostienen que el tiempo de relajación del material es igual a:

$$\tau = \frac{X^2 C_p \rho}{K} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Dónde:

X : Longitud del medio de transmisión de calor. En este caso viene a ser el tamaño de grano del material.

C_p : Calor específico a presión constante.

ρ : Densidad del material.

K : Conductividad térmica del material.

A partir de las Ecuaciones 2 y 4 se observa la influencia del tamaño de grano en la capacidad de liberación de energía del elemento. El tiempo de relajación τ es una propiedad del material no relevante en el gradiente macrotérmico de cuánto tiempo toma el alivio de tensiones en el material, sin embargo es importante para estimar la cantidad de energía disipada por ciclo (Skinner, 1987).

Mientras el elemento vibra, el calor aumenta causando un aumento infinitesimal de temperatura. Esta relación entre energía vibracional y térmica genera el mismo efecto que el producido por tratamiento térmico en alivio de tensiones a nivel de estructura cristalina, donde finalmente se reducen los

esfuerzos residuales de un material. Asimismo, la región subarmónica es la que muestra el mejor desempeño para efectos de alivio de tensiones por vibración.

Tal como se detalló en acápite anteriores, uno de los principios del alivio de tensiones por medio de vibraciones radica en el hecho de que todos los metales vibran cuando se les somete al efecto de una carga súbita que luego deja de ser aplicada, y continuará vibrando hasta que toda su energía sea disipada por medio de la fricción interna. Skinner (1987) elaboró el modelo de la Figura 12 para representar una viga simplemente apoyada que mientras vibra sufre una deformación elástica por flexión. Un elemento infinitesimal sobre ésta viga pasará desde un estado de tracción en el punto +Y (máximo) hasta uno de compresión en -Y (mínimo). De esta forma, la energía elástica de deformación por ciclo equivale a dos veces el valor estimado.

El método de energía de Rayleigh permitió a Skinner (1987) calcular la frecuencia natural de un cuerpo a partir del principio de conservación de la energía: la suma de la energía cinética y potencial es igual a una constante cumpliéndose, además, que la energía cinética máxima es igual a la energía potencial máxima.

De la misma forma que en un modelo masa-resorte, la energía cinética es máxima en el punto medio de la vibración donde la velocidad es más alta y equivale al trabajo externo realizado por la viga debido a la vibración. Por su parte, la energía potencial equivale al trabajo interno realizado en la viga en forma de energía de deformación que es máxima en el punto de máxima deflexión $\pm Y$.

$$\omega = k\pi^2 \sqrt{\frac{g EI}{w L^4}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Dónde:

- g: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).
- E: Módulo de elasticidad del material
- I: Momento de inercia de la sección
- w: peso lineal de la viga
- L: Longitud de la viga entre apoyos
- K: Constante dependiente del tipo de apoyos sobre la viga

Por lo tanto, la frecuencia natural de una viga puede ser calculada si se conoce la rigidez (EI), la longitud (L) y las restricciones en los límites (K).

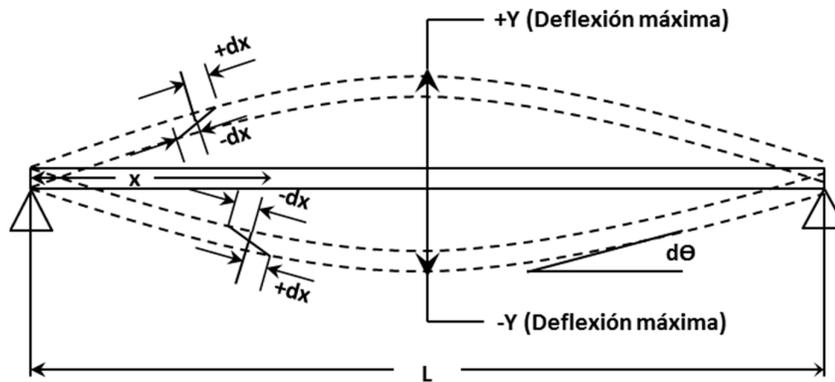


Figura 12. Modelo de viga vibratoria de Skinner.

Fuente: Skinner (1987, p8)

Cuando una vibración forzada con una frecuencia variable se somete sobre una viga, ambas frecuencias, forzada y natural, actúan sobre el cuerpo hasta que la frecuencia natural es amortiguada por el material. Cuando ambas frecuencias coinciden, las energías se superponen ocasionando que la energía cinética y la amplitud de la vibración se incrementen dramáticamente (resonancia).

2.5.2. El desplazamiento de la curva armónica debido a los esfuerzos residuales

Todos los cuerpos metálicos tienen una frecuencia armónica. Si la pieza ha sido sometida a un choque térmico (que le originó tensiones residuales) durante su proceso de manufactura, el pico armónico se ubicará en una frecuencia no natural. Por medio de la aplicación de las vibraciones subarmónicas el componente neutralizará los esfuerzos residuales y al hacerlo, el pico armónico se desplazará y permanecerá en una nueva frecuencia, la nueva frecuencia armónica. Hebel (1997) describe este fenómeno con un ejemplo relacionado a un instrumento musical desafinado (bajo tensión residual) y que se afina hasta que es posible escuchar su nota natural (aliviado).

Wong y Johnson (1987) realizaron estudios experimentales para estimar el cambio entre la frecuencia natural de una viga simplemente apoyada libre de esfuerzos residuales versus la frecuencia natural de la misma viga sometida a esfuerzos residuales. Su análisis concluyó que la frecuencia natural (ω_0) de una pieza sometida a esfuerzos se encuentra en una posición anti-natural ω que en el caso del aluminio 7039-T6 se encontró alrededor de $\pm 2.7\%$ alejada de su frecuencia natural.

$$\left| \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right| \leq \frac{\bar{\alpha} S_M}{\sqrt{5} E_0} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Dónde:

ω_0 : Frecuencia natural en ausencia de esfuerzos residuales

ω : Frecuencia natural en presencia de esfuerzos residuales

$\bar{\alpha}$: Parámetro no lineal que resulta de la combinación de las constantes elásticas de segundo y tercer orden propias de cada material.

S_M : Esfuerzo máximo de tensión del material.

E_0 : Módulo de Young.

Del mismo modo Wong y Johnson (1987, p. 14) resaltaron que el cambio relativo sobre la frecuencia natural es el mismo para todos los modos de vibración. Estimando el valor del cambio relativo sobre las frecuencias para el caso del acero estructural en el que S_M toma valores de 400 a 550 MPa, con un módulo E_0 de 200 GPa, y un parámetro $\bar{\alpha} = 10.7$, se obtiene que:

$$\left| \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right| \leq [0.95\%, 1.35\%]$$

Para la evaluación de la respuesta vibratoria según Wong y Johnson (1987) se han tomado en cuenta la variación de los módulos de Young y de Poisson y las aproximaciones provenientes de la teoría de vigas de Euler-Bernoulli en la cual se considera que las secciones planas inicialmente perpendiculares al eje de la viga, siguen siendo perpendiculares a dicho eje una vez curvado.

El efecto del esfuerzo residual sobre la rigidez a la flexión y sobre la frecuencia natural aparece en su segundo momento alrededor del eje neutro. Un estado de tensión ocasionado por un temple genera que en la región externa de la sección transversal del perfil ($X_2 \rightarrow \pm h$) esté en compresión, mientras que en la región interna ($X_2 \rightarrow 0$) se encuentre bajo tensión y tenderá a incrementar la rigidez de la viga y de su frecuencia natural. De otro lado, los esfuerzos residuales ocasionados por la deformación inelástica seguida de una descarga serán asimétricos respecto del eje neutro de manera que su segundo momento, G_r , será cero.

Wong y Johnson (1987) establecieron que la curva armónica será alterada en función del nivel de esfuerzos residuales contenidos en el objeto concluyendo que el desplazamiento en la frecuencia natural como resultado de la existencia de los esfuerzos residuales sirve como medio para analizar y evidenciar la efectividad

del tratamiento de alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas (Figura 13).

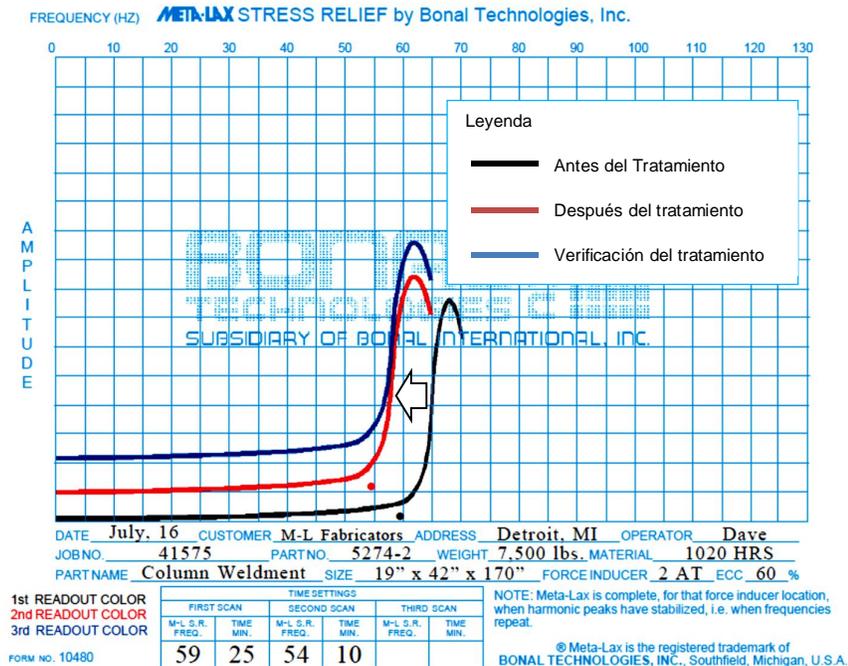


Figura 13: Comportamiento de la curva armónica antes y después del tratamiento bajo vibraciones subarmónicas.

Fuente: Bonal Technologies (1998)

2.6. El consumo de energía en hornos convencionales de tratamiento térmico

Auces y Rodríguez (2003) calcularon el consumo de gas licuado de petróleo (GLP) en un horno de tratamiento térmico en base a principios termodinámicos de combustión y transferencia de calor y al balance entre materia y energía considerando que la energía generada por gases de combustión es igual a: (a) la energía que absorbe tanto la pieza tratada como las paredes del horno; (b) las pérdidas de conducción y radiación, y; (c) por el escape de gases de combustión.

Partiendo de un balance de energía en el cual se establece que la cantidad de calor que entra en un horno de relevo de esfuerzos es igual a la cantidad de calor que sale más la que se concentra en la pieza y en las paredes aisladas, Auces y Rodríguez (2003) estimaron que se requieren 792,371.20 kJ/Hr para calentar una estructura soldada de Acero ASTM A36 de 50 toneladas en un horno de 6m x 6m x 12m desde 25°C hasta 650°C. Para efectos comparativos en esta investigación, no se considerarán las pérdidas de calor por paredes, el calor perdido en la chimenea por los gases de combustión, ni el calor perdido por las aberturas

del horno sino únicamente la energía absorbida por la pieza tratada. Por otro lado, si consideramos que en el mercado local el precio unitario promedio es de S/ 1.42 por kilogramo (Petroperú, 2015), sólo en combustible se estima un costo de S/ 97.00 por cada hora que dure el proceso de elevación y mantenimiento de temperatura en un horno de tales dimensiones.

El tiempo de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento de las piezas de acero al carbono a ser aliviadas térmicamente varía en función del tipo de aleación, y de la geometría de la pieza, además debe considerar el periodo de calentamiento de la pieza a una temperatura uniforme en un rango de 550°C a 650°C por un lapso mínimo de dos horas además del tiempo de enfriamiento lento al interior del horno a una gradiente que va de 6°C a 15°C por hora (Mesa, 2005; y Machado, 2002). De acuerdo a esta información es posible estimar el tiempo teórico del tratamiento térmico de alivio de tensiones. En la realidad nacional es necesario considerar que los tratamientos térmicos son servicios prestados por un número limitado de proveedores que establecen tiempos de entrega para las piezas procesadas que van desde uno hasta tres días útiles, sea con el uso de hornos o de mantas térmicas.

2.7. Técnicas utilizadas para la medición de esfuerzos residuales

Monsalve, López, y Galvis (2007) hicieron una revisión de los fundamentos de las técnicas más utilizadas para la medición de esfuerzos residuales en películas delgadas cuya aplicación es pertinente para los efectos del presente estudio y sobre los cuales se centra íntegramente el presente acápite.

En los esfuerzos residuales hay dos componentes a tener en cuenta: tensión y compresión. Los esfuerzos compresivos se generan porque los átomos se encuentran más juntos de lo que deberían estar. Los esfuerzos de tensión se producen porque los átomos se ubican en un espacio de la red interatómica que es muy grande comparado con su tamaño, lo cual hace que los átomos circundantes queden en tensión. Estos esfuerzos suelen ser más nocivos que los esfuerzos de compresión, coadyuvando a la formación de grietas perpendiculares a la dirección del esfuerzo. En cambio, una pequeña cantidad de esfuerzos compresivos suele ser benéfica puesto que aumenta la resistencia a la fatiga, evita la propagación de grietas y la corrosión bajo esfuerzos (Monsalve *et al.*, 2007, p.766).

La selección de la técnica de medición adecuada depende de muchos factores tales como la información que se quiere obtener, costo del análisis,

disponibilidad del equipo, tamaño de la muestra, clase de material, rapidez de la medición y si el ensayo es destructivo o no, entre otros. Algunas de las técnicas más utilizadas para medir estos esfuerzos son la técnica del agujero ciego, la difracción de rayos X, entre otras.

2.7.1. Técnica del agujero ciego

Es un método semidestructivo porque el daño que causa es muy localizado y muchas veces no afecta apreciablemente el desempeño de la pieza. El método consiste en adherir, galgas extensométricas en tres direcciones no coincidentes sobre un punto de la pieza cuyas tensiones residuales se desea medir, de la siguiente forma:

- a. Instalando una galga indicadora de esfuerzos en la región del componente que requiere ser analizada.
- b. Se taladra un pequeño agujero en el centro de la galga.
- c. Las bandas miden la variación de desplazamiento en cada dirección la recuperación de las deformaciones elásticas.
- d. Se hace la lectura de los esfuerzos relajados.
- e. Conocidos los desplazamientos en tres direcciones, se puede conocer el campo de deformaciones lineales producido al separar el elemento de la pieza.
- f. Se calculan los esfuerzos residuales iniciales a partir de los esfuerzos relajados siguiendo un procedimiento estandarizado.

Se debe escoger adecuadamente el tamaño y tipo de sensor (Figura 14) al igual que el tamaño del taladro, ya que ellos determinarán la profundidad a la cual puede realizarse la medida (Kandil, Lord, Fry, & Grant, 2001). La galga tiene como función registrar la deformación producida por la relajación de esfuerzos ocasionada, a su vez, por la remoción de material de un agujero en la pieza. Esta relajación ocurre porque cada perpendicular a una superficie libre (en este caso la superficie del agujero) es necesariamente un eje principal sobre el cual los esfuerzos cortantes y normales son cero. La eliminación de estos esfuerzos sobre la superficie del agujero cambia los esfuerzos en la región circundante, causando que los esfuerzos locales sobre la superficie de la pieza analizada cambien correspondientemente (Vishay Precision Group, 1993).

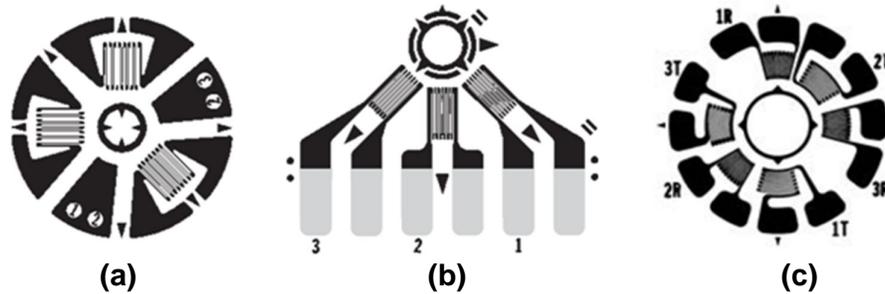


Figura 14: Tipos de sensores extensométricos. (a) Recomendado para propósitos generales. (b) Galga para hacer mediciones cerca de un obstáculo. (c) Galga útil cuando se requiere una gran susceptibilidad a los esfuerzos y una alta estabilidad térmica.

Fuente: Vishay Precision Group (1993, p. 503).

Los esfuerzos medidos por el sensor se relacionan con los esfuerzos residuales iniciales de la forma como lo indican las ecuaciones 7 y 8:

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = [(\epsilon_3 + \epsilon_1)/4A] \pm \{[(\epsilon_3 + \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2]^{1/2}\}/4B \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$\beta = 1/2 \arctan (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2) / (\epsilon_3 + \epsilon_1) \quad \text{Ecuación (8)}$$

Dónde:

σ_{\max} y σ_{\min} : Esfuerzos residuales principales

ϵ_r : Esfuerzos relajados medidos por el sensor alineado radialmente y centrado en P.

β : Angulo medido en el sentido de las agujas del reloj desde la localización del sensor 1 de la Figura 15, hasta la dirección de σ_{\max} .

A y B: Constantes empíricas.

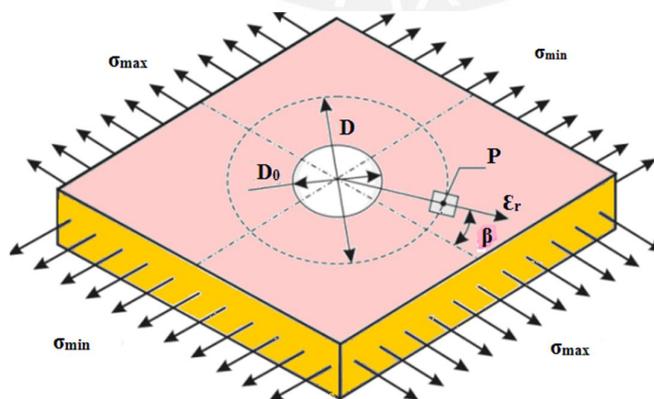


Figura 15. Estado de los esfuerzos residuales en el punto P después de la introducción de un agujero.

Fuente: Monsalve *et al.* (2007, p.767)

2.7.2. Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X es una técnica muy versátil, no destructiva y mide los esfuerzos a nivel macro y micro. La medición se realiza colocando la muestra en el difractómetro, y exponiéndola a rayos X que interactúan con la red cristalina para generar un patrón de difracción. Los rayos X son producidos cuando electrones con suficiente energía cinética son rápidamente desacelerados. Cuando un rayo X alcanza la superficie de un cristal a cualquier ángulo θ , una porción es dispersada por la capa de átomos de la superficie (Figura 16). La porción no dispersada penetra en la segunda capa de átomos donde otra vez una fracción es dispersada y la que queda pasa a la tercera capa. El efecto acumulativo de esta dispersión desde los centros regularmente espaciados del cristal es la difracción del haz. Los requisitos para la difracción de rayos x son: (a) que el espaciado entre capas de átomos sea aproximadamente el mismo que la longitud de onda de la radiación y, (b) que los centros de dispersión estén distribuidos en el espacio de una manera muy regular (Skoog, Holler, & Nieman, 2001).

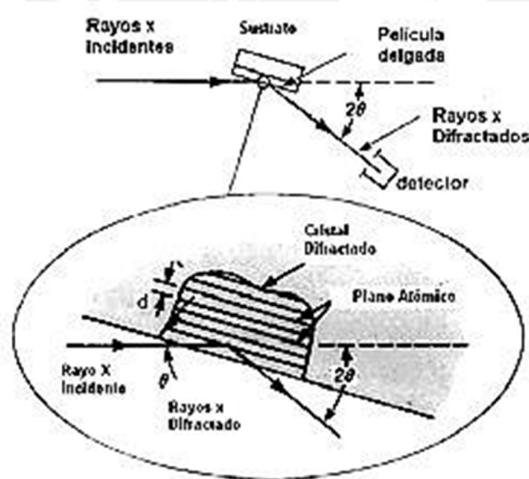


Figura 16: Características básicas de un experimento de Difracción de Rayos X.

Fuente: Brundle, Evans, y Wilson (1992) en Monsalve *et al.* (2007, p. 768)

La Ecuación 9 es conocida como la ley de Bragg y es de fundamental importancia en la difracción de rayos X:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad \text{Ecuación (9)}$$

Cabe que señalar que los rayos X parecen ser reflejados por el cristal sólo si el ángulo de incidencia satisface la condición:

$$\text{sen}\theta = n\lambda/2d.$$

Ecuación (10)

Dónde:

n: Número entero.

 λ : Longitud de onda de los rayos X

d: Distancia interplanar.

 θ : Ángulo que se forma entre el rayo x incidente y el rayo x difractado. 2θ : Ángulo formado entre el plano atómico y el rayo X difractado (Skoog *et al.*, 2001)

A los demás ángulos tienen lugar interferencias destructivas. La técnica de DRX es una técnica de medición indirecta porque lo que verdaderamente mide es la deformación interpretada como la variación en la distancia interplanar relativa entre planos cristalinos, esta deformación causa cambios en el espaciamiento reticular desde su valor libre de esfuerzos a un nuevo valor que corresponde a la magnitud del esfuerzo aplicado. Un material está libre de esfuerzos cuando el valor de la distancia interplanar es independiente de la orientación de estos planos con respecto a la muestra (deformación $\varepsilon = 0$, ver Figura 17). En cambio, en un material sometido a tensión la deformación será función de la orientación del plano respecto de la tensión σ (Mingolo y Ortiz, 2000). De la ley de Bragg se puede deducir la expresión de la deformación en función del ángulo de difracción:

$$\varepsilon = \Delta d/d = -\cotg \theta \Delta\theta$$

Ecuación (11)

Es decir una variación del espaciado cristalino Δd se traduce en un desplazamiento del pico de difracción $\Delta 2\theta$. Dicho desplazamiento es tanto mayor cuanto más grande sea el ángulo de difracción, debido al factor $\cot\theta$. En la práctica esto lleva a utilizar ángulos de Bragg grandes ($2\theta > 120$) para obtener una mayor precisión (Prevéy, 1986).

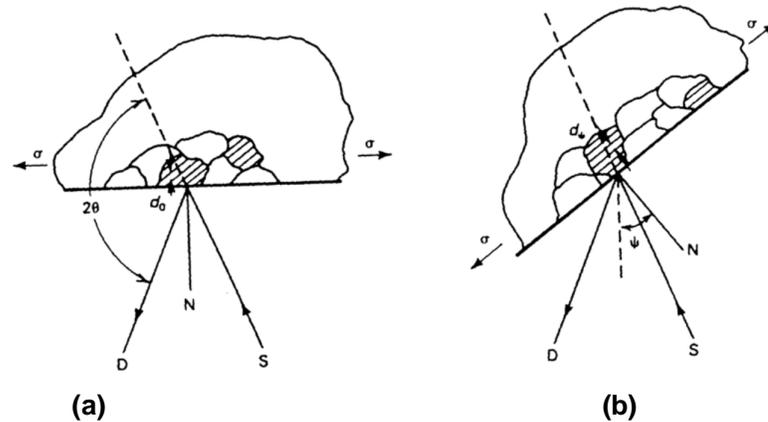


Figura 17: Arreglo y orientación de planos para medición DRX (a) $\psi = 0$. (b) $\psi = \psi$ (muestra rotada un ángulo conocido ψ). D: Detector de rayos X; S: Fuente de rayos X; N: Normal a la superficie.

Fuente: Prevéy (1986, p.2)

El método de rayos X más utilizado para determinar los esfuerzos residuales superficiales es el “Método de $\sin^2\psi$ ”, que permite determinar la distribución de la deformación de la red cristalina en una capa fina superficial. La principal ventaja de este método, considerando que requiere de un tiempo adicional para la recolección de datos, es el establecimiento de la linealidad de la distancia interplanar en función de $\sin^2\psi$ (Juy Aguirre, 2004; citado por Monsalve *et al.*, 2007).

En la Figura 18 se muestra una película cristalina sometida a esfuerzos de tensión. El espacio entre los planos reticulares que son perpendiculares al plano de la película se incrementa, debido a la tensión, mientras el espaciamiento de los planos paralelos a la película disminuye, debido a la contracción del coeficiente de Poisson (Kraft & Gao, 2005; en Monsalve *et al.*, 2007)

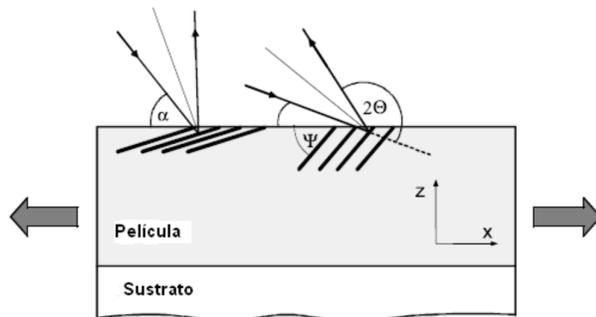


Figura 18. Representación esquemática del método de $\sin^2\psi$

Fuente: Kraft y Gao (2005) en Monsalve *et al.* (2007, p. 768)

En este método se asume un estado biaxial de esfuerzos, el cual requiere que la medición de esfuerzos esté relacionada al esfuerzo principal σ_1 y σ_2 (ver Figura 19) mediante la Ecuación 12:

$$\epsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 \cos^2\phi + \sigma_2 \sin^2\phi) \sin^2\psi \right] - \left[\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad \text{Ecuación (12)}$$

Dónde:

$\epsilon_{\phi\psi}$: Variación relativa entre el espacio interplanar que existe en los planos atómicos perpendiculares a la dirección ψ en condición estresada y el espaciamiento interplanar en condición libre de esfuerzos.

ν : Coeficiente de Poisson.

E : Módulo de Young.

α_1 y α_2 son los cosenos de los ángulos del vector de esfuerzo:

$$\alpha_1 = \cos\phi \sin\psi$$

$$\alpha_2 = \sin\phi \sin\psi$$

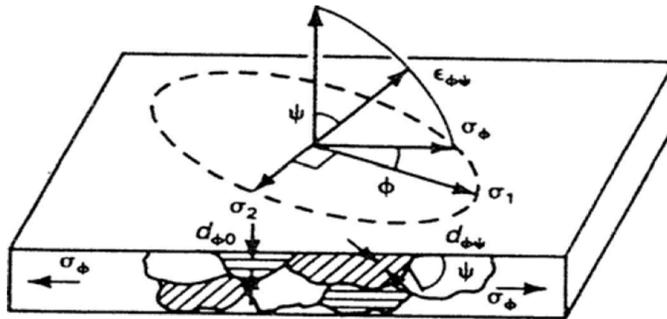


Figura 19: Orientación de los componentes de la deformación en esfuerzos planos.
Fuente: Prevéy (1986, p. 6)

El espaciamiento interplanar sirve como un indicador de esfuerzos internos (Figura 16) y el esfuerzo se mide a lo largo de cierta dirección (Ecuación 13).

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde $d_{\phi\psi}$ es el espaciamiento interplanar que existen en los cristales que son perpendiculares a la dirección ψ en la condición estresada y d_0 el espaciamiento interplanar en la condición libre de esfuerzos.

La principal restricción de la difracción por rayos X es que la medición de esfuerzos se limita a la superficie de la muestra. Para explorar nuevas superficies

Prevéy (1986) recomienda remover capas de material realizando un tratamiento de electropulido. En toda superficie expuesta es necesario asumir la condición de esfuerzo plano lo cual implica que la distribución de esfuerzos principales σ_1 y σ_2 se da únicamente en la superficie sin considerar el esfuerzo perpendicular a ella ($\sigma_3=0$). Sin embargo un componente perpendicular de deformación ε_3 existe como consecuencia de la contracción de Poisson producida por σ_1 y σ_2 .

La ecuación 14 describe la relación fundamental entre el espaciamiento de los planos atómicos y los esfuerzos biaxiales en la superficie evaluada. En ella las constantes elásticas $(1 + \nu)/E_{(hkl)}$ y $(\nu/E)_{(hkl)}$ no son los valores absolutos sino los valores para la dirección normal al plano cristalográfico en el cual se está midiendo la deformación y que está identificado bajo la nomenclatura de los índices de Miller (hkl). Debido a la anisotropía elástica, las constantes elásticas en la dirección (hkl) por lo general varían de forma significativa respecto a los valores mecánicos absolutos, que están dados por los promedios en todas las direcciones posibles en la estructura cristalina

$$d_{\phi\psi} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} d_0 \text{sen}^2 \psi \right] - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} d_0 (\sigma_1 + \sigma_2) + d_0 \right] \quad \text{Ecuación (14)}$$

En esta ecuación se puede observar que el espacio interplanar $d_{\phi\psi}$ es una función lineal de $\text{sen}^2 \psi$.

2.7.3. Técnica de ultrasonido para medición de esfuerzos residuales

Esta técnica se basa en el efecto de elasticidad acústica de los materiales, de acuerdo al cual la velocidad de propagación de onda elástica depende del esfuerzo mecánico del material. La relación entre los cambios de velocidad de onda ultrasonido longitudinal y ondas de corte de polarización ortogonal bajo la acción de cargas externas de tracción y compresión en acero y aluminio fueron graficadas por Kudryavtsev, Kleiman, Smilenko, y Brodovy (2011) en la Figura 20. En esta técnica las velocidades de onda longitudinal ultrasonido y la onda de corte de polarización ortogonal son medidas en un punto de tal forma que se determinen los esfuerzos uniaxiales y biaxiales. Las ondas de masa son utilizadas para determinar los esfuerzos promedio a lo largo del espesor del elemento analizado mientras que las ondas de superficie son usadas para medir los esfuerzos uniaxiales y biaxiales en la superficie del material.

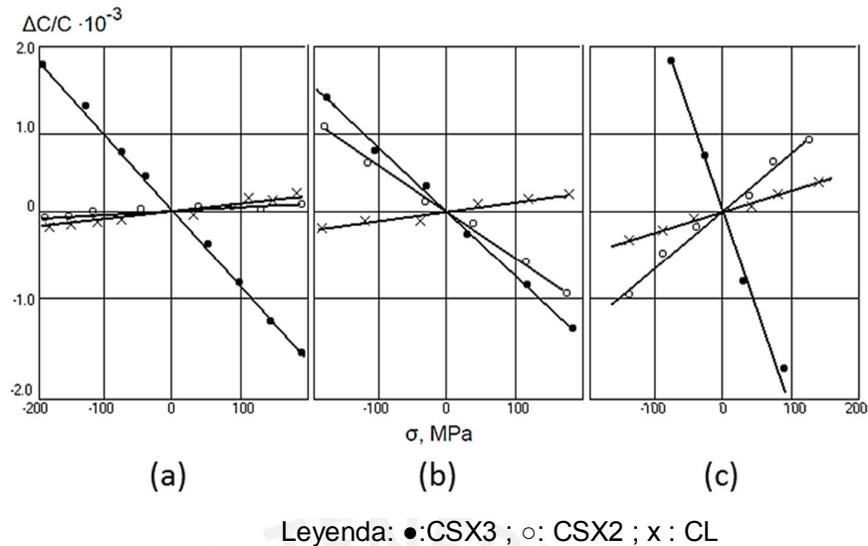


Figura 20: Cambios en la velocidad de onda ultrasónica longitudinal (CL) y ondas de corte de polarización ortogonal (CSX3; CSX2) en función de tensión mecánica en (a) Acero A; (b) Acero B; y (c) Aleación de Aluminio.

Fuente: Kudryavtsev *et al.* (2011, p.2)

2.7.4. Método de difracción de neutrones

La técnica por difracción de neutrones es capaz de hacer mediciones de esfuerzos residuales en forma no destructiva a varios centímetros debajo de la superficie de muchos metales. La técnica de difracción de neutrones para determinar esfuerzos residuales se fundamenta en la medición precisa de la separación de planos similarmente orientados en una estructura policristalina. De forma similar al principio de difracción de rayos X, esto se alcanza por la interacción de la dispersión de ondas, las cuales producen picos de difracción máximos, donde la posición de estos picos está dada por la ley de Bragg (Ecuación 8). Consecuentemente, las mediciones se llevan a cabo de manera similar a las realizadas con difracción de rayos X, con un detector que se mueve alrededor de la muestra, ubicando la posición de haces difractados de alta intensidad. La gran ventaja que este método ofrece sobre el método de difracción de rayos X es la profundidad de penetración grande que se obtiene con los neutrones. Es posible medir volúmenes de 100 mm^3 en aluminio o 25 mm^3 en acero. Con alta resolución espacial, la difracción de neutrones puede proveer mapas completos de deformación en tres dimensiones para componentes de ingeniería (Figura 21). Esto se alcanza a través de movimientos de rotación y traslación del componente. Este método de evaluación de esfuerzos residuales posee la particularidad de recabar grandes cantidades de datos sobre la superficie y profundidad del componente

(dependiendo del espesor de la muestra) lo que hace de la difracción de neutrones una técnica particularmente usada para la validación de modelos teóricos y numéricos. Sin embargo, comparada con otras técnicas tales como difracción de rayos X, su costo es relativamente más alto y la disponibilidad es mucho menor (Kandil *et al.*, 2001). Por ejemplo, mientras que una medición de difracción de rayos X en único punto cuesta alrededor de US\$ 100, un ensayo de difracción de neutrones puede fluctuar entre US\$ 200 y US\$300 (Ezeilo & Webster, 1999). Entre las ventajas con las que cuenta este método están su excelente penetración y resolución y, además, se tiene medidas en tres dimensiones y es capaz de medir macro y micro esfuerzos residuales. Las desventajas que presenta es que sólo puede ser aplicado en un laboratorio (Reséndiz, 2011). En la Figura 21 se muestran los resultados de la medición de esfuerzos residuales por difracción de neutrones en la parte central de una pieza de aluminio fundido de uso aeroespacial, antes y después del proceso de alivio de tensiones bajo un método similar al que será utilizado en esta investigación, el de vibraciones subarmónicas.

Prohaszka, Hidas, y Varga (1974) realizaron ensayos en probetas de acero de bajo carbono de 25 x 150 x 500 mm soldadas de forma paralela al eje longitudinal de simetría. De forma similar a la Ecuación 12 determinaron la distribución interna de esfuerzos por medio de ensayos de difracción de rayos X bajo el supuesto que los esfuerzos internos y el cambio de la distancia interplanar estaban relacionados de la siguiente manera:

$$R = \left[\frac{a-a_0}{a_0} \right] E \quad \text{Ecuación (15)}$$

Dónde:

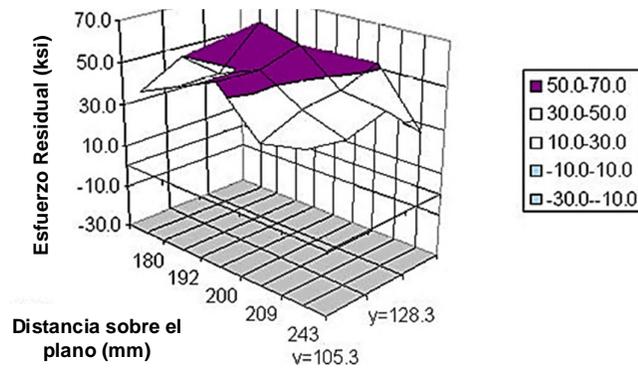
R: Esfuerzo residual

a: Distancia interplanar antes del alivio de tensiones

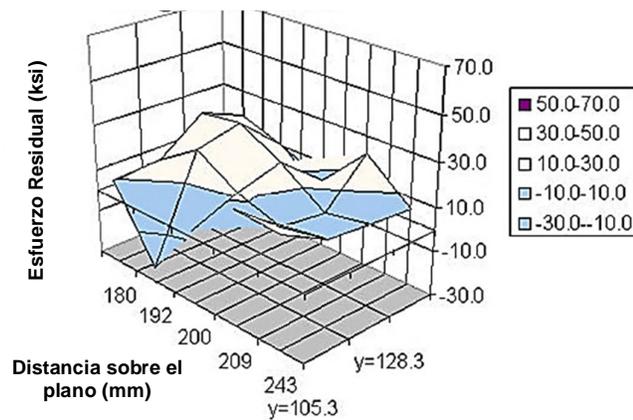
a_0 : Distancia interplanar sin tensiones residuales

E: Módulo de Young

En ese estudio, los esfuerzos residuales de las probetas alcanzaban el punto de fluencia del material base y la curva de esfuerzos internos versus distancia al centro de cordón de soldadura resultó como la mostrada en la Figura 22 y lograron medir los resultados que se muestran en la Tabla 1.



(a)



(b)

Figura 21: Medición de esfuerzos residuales por difracción de neutrones en la parte central de una pieza de aluminio fundido de uso aeroespacial: (a) Antes del alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas, promedio de esfuerzos de tensión 45 ksi; (b) Después del alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas, promedio de esfuerzos de tensión 0 ksi.

Fuente: Bonal Technologies, Inc. (1999).

Tabla 1. Resistencia Máxima a la Tracción Registrada

Estado	Promedio de máxima resistencia a la tracción (N/mm ²)
Antes del alivio de esfuerzos	380
Vibrado durante un ciclo	382
Tratado térmicamente (650°C/1 hora)	347

Fuente: Prohaszka *et al.* (1974, p.74)

Los mismos investigadores resaltaron, sin embargo, que el efecto del proceso de vibraciones solo puede ser determinado mediante métodos de ensayos mecánicos y sobre la base de un gran número de ensayos debido a la importancia de la desviación estándar en tales ensayos. Sin embargo son poco útiles debido a su carácter de destructivos.

Tomando como referencia los resultados experimentales de Prohaszka *et al.* (1974), en esta investigación se pretende realizar mediciones similares a fin de establecer hasta tres perfiles de esfuerzos sobre las probetas soldadas: (a) Antes del alivio de tensiones; (b) Después del alivio de tensiones mediante tratamiento térmico; y (c) después del alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas tomando como referencia los estudios previos ya mencionados y bajo la metodología que se detalla en el Capítulo III.

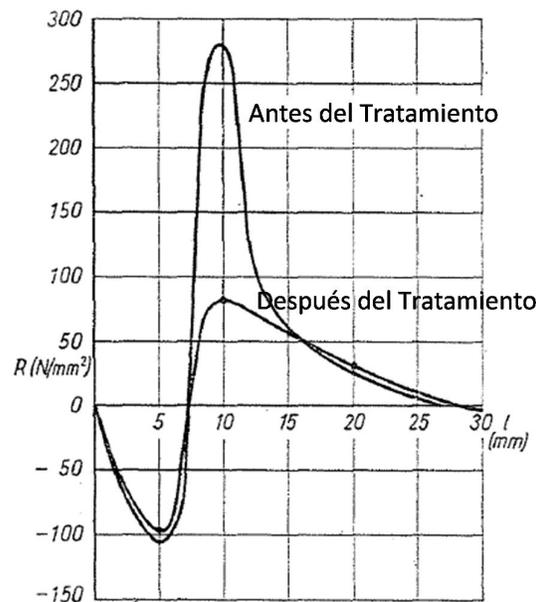


Figura 22. Curvas de distribución de esfuerzos antes y después del proceso de vibración.

Fuente: Prohaszka *et al.* (1974, p.72)

2.8. Emisión de Gases de Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero son componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como originados

por la actividad humana, que absorben y re-emiten radiación infrarroja. A medida que se incrementa la concentración de estos gases, la radiación infrarroja

es absorbida en la atmósfera y re-emitada en todas direcciones, lo que contribuye a que la temperatura media de la Tierra aumente. Este fenómeno se denomina Efecto Invernadero, porque la absorción y posterior emisión de radiación infrarroja también la hacen el vidrio y ciertos plásticos con los que se fabrican los invernaderos (Oficina Catalana de Cambio Climático, 2011). Los gases atmosféricos que contribuyen al efecto invernadero son:

- a. Dióxido de carbono (CO_2)
- b. Metano (CH_4)
- c. Óxido nitroso (N_2O)
- d. Vapor de agua
- e. Ozono
- f. Los halocarbonos: los hidrofluorocarburos (HFC), los perfluorocarburos (PFC), el hexafluoruro de azufre (SF_6) y el trifluoruro de nitrógeno (NF_3)

Los cuatro primeros se encuentran de forma natural en la composición de la atmósfera. Por su parte, la actividad industrial, al quemar combustibles fósiles, desprende grandes cantidades de dióxido de carbono y óxido de nitrógeno. El metano se genera como resultado de la actividad agrícola y ganadera. Los halocarbonos son gases de origen antropogénico empezados a fabricar a partir de los años cuarenta.

De acuerdo con la Oficina Catalana de Cambio Climático (2011) por cada kilogramo de Gas Licuado de Petróleo se emiten 2.96 kg de Dióxido de Carbono (CO_2), mientras que por cada Kilowatt-hora de energía eléctrica activa se emiten 0.267 kg de CO_2 . Estos datos serán importantes a efectos de realizar una comparación del tipo costo-beneficio entre el tratamiento térmico de alivio de tensiones en horno eléctrico y el de alivio por vibraciones subarmónicas.

2.9. Resumen

En este capítulo se establecieron los conceptos básicos de esfuerzo residual, se expusieron las causas que pueden originar esfuerzos residuales en uniones soldadas y en perfiles laminados en caliente y se hizo una reseña acerca de los principales métodos que actualmente existen para la medición de esta clase de esfuerzos. Asimismo, de acuerdo a la literatura revisada, se sentaron los principales lineamientos en base a los cuales se realizaron los experimentos conducentes a evaluar el efecto de la aplicación del alivio de tensiones residuales

por vibraciones subarmónicas sobre una unión soldada y compararlo contra el efecto del tratamiento térmico de alivio de tensiones.



CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se detalla el procedimiento empleado para la realización de las probetas soldadas así como los métodos que se siguieron para la caracterización y determinación de las propiedades de las uniones soldadas y el material base, acero al carbono ASTM A36.

Las probetas sometidas a ambos tipos de tratamiento de alivio de tensiones (térmico y por vibraciones subarmónicas) fueron fabricadas en los talleres la empresa metalmecánica Tama Ingenieros S.A.C. con sede en Ate, Lima, Perú. El proceso de alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas fue realizado también por dicha empresa, mientras que el proceso de tratamiento térmico de alivio de tensiones fue encargado a la empresa Aceros del Perú S.A.C. En general, las probetas fueron procesadas de la siguiente manera:

- a. Habilitado, soldadura y rotulado de seis probetas de 9.5 mm x 150 mm x 400 mm (con marcas 9ST1, 9ST2, 9TT1, 9TT2, 9AV1 y 9AV2).
- b. Inspección dimensional y ensayos no destructivos (END) de líquidos penetrantes.
- c. Embalaje y envío aéreo al laboratorio de medición por difracción de rayos X de Proto Mfg, en Michigan, USA, de las probetas 9AV2 y 9TT2.
- d. Electroerosionado a 0.5 mm de profundidad para eliminar la capa de material superficial en el laboratorio de Proto Mfg, en Michigan, USA.
- e. Selección e identificación de puntos de medición de esfuerzos residuales.
- f. Medición de tensiones residuales “*as weld*” en diversos puntos alineados de forma transversal al cordón de soldadura mediante DRX en el laboratorio de Proto Mfg, en Michigan, USA.
- g. Embalaje y envío aéreo de retorno a Lima, Perú.
- h. Alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas de la probeta 9AV2 en los talleres de TAMA INGENIEROS S.A.C.
- i. Alivio de tensiones por tratamiento térmico de la probeta 9TT2 en planta de Aceros del Perú S.A.C.
- j. Embalaje y segundo envío aéreo al laboratorio de medición por difracción de rayos X de Proto Mfg, en Michigan, USA, de las probetas 9AV2 y 9TT2.
- k. Ensayo de medición de tensiones residuales post-tratamiento en los mismos puntos medidos inicialmente (paso e) en el laboratorio de Proto Mfg, en Michigan, USA.

I. Análisis y comparación de resultados antes y después de ambos tratamientos.

3.1. Características nominales del material base

El material base elegido para la fabricación de las probetas soldadas fue una plancha de acero al carbono de uso estructural ASTM A36 de 9.5 mm de espesor, comúnmente utilizado en la fabricación de estructuras metálicas para diversas aplicaciones industriales.

No se realizaron ensayos de caracterización del metal base, sin embargo, de acuerdo al certificado de calidad de la plancha de acero de la cual se extrajeron las probetas N° z201306240166 emitido por Hebei Iron & Steel Co. Ltd. (Anexo A), éste contenía 0.19% de carbono, 0.05% de silicio, 0.23% de manganeso, 0.016% de fósforo, 0.07% de azufre, 0.0017% de nitrógeno, 0.02% de cromo, 0.01% de níquel, y 0.01% de cobre. Asimismo, le certificado registró un límite de fluencia de 334MPa, y una resistencia a la tracción de 452MPa.

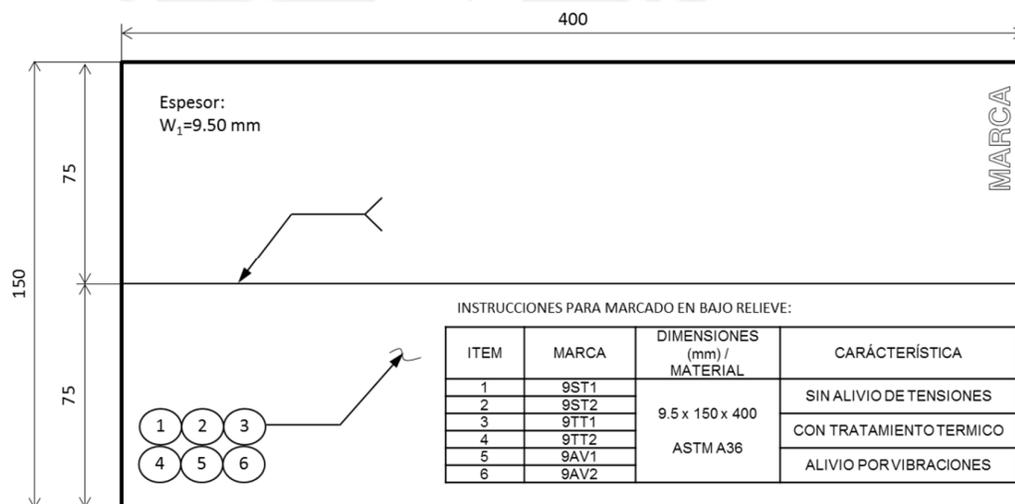


Figura 23. Dimensiones y rotulado de probetas de acero ASTM A36 para ensayo DRX.

3.2. Preparación de probetas

Se prepararon seis probetas de 9.5 mm x 150 mm x 400 mm de acero al carbono ASTM A-36 soldadas bajo el método FCAW (soldadura por arco eléctrico con núcleo de fundente). Las probetas fueron agrupadas en tres juegos de dos probetas rotuladas y procesadas de la siguiente forma y tal como se especifica en la Figura 23:

- a. 9AV1 y 9AV2: Probetas soldadas y sometidas a proceso de alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas.
- b. 9TT1 y 9TT2: Probetas soldadas y sometidas a proceso de alivio de tensiones por tratamiento térmico
- c. 9ST1 y 9ST2: Probetas soldadas, sin ningún tratamiento posterior (*as weld*).

El tamaño de las probetas fue determinado tomando como referencias investigaciones previas como las de Prohaszka *et al.* (1974) y la de *The National Shipbuilding Research Program* (1990) en las que se utilizaron probetas de 150 x 500 y 150 x 304 mm de ancho y largo, respectivamente.

Para contrastar los resultados experimentales y la base teórica descrita por Connor (1987, véase la Figura 3) los esfuerzos residuales “superficiales” fueron medidos sobre seis puntos situados a lo largo del eje transversal de cada probeta, tal como se muestra en la Figura 24, estando el primero de ellos (rotulado con la letra “a”) ubicado al pie del cordón de soldadura. Asimismo, los esfuerzos fueron medidos en la mitad longitudinal derecha de la probeta bajo el supuesto, nuevamente basado en los antecedentes teóricos, que su distribución es simétrica con respecto a la línea media longitudinal.

3.3. Características de las Uniones Soldadas

Para la realización de los cupones soldados de las cuales se obtuvieron las probetas se utilizó el procedimiento de soldadura descrito a continuación:

- a. Tipo de junta: El tipo de junta que se utilizó fue la junta a tope en doble V.
- b. Limpieza de bordes: Para obtener una superficie adecuada antes de realizar el proceso de soldadura en las platinas de acero ASTM A36, se limpiaron mecánicamente sus cantos con una amoladora para quitar todo óxido e impurezas superficiales. La zona esmerilada fue como mínimo hasta 20 milímetros desde cada borde. Esta operación demandó el uso de implementos de seguridad especialmente de guantes, lentes y respiradores.
- c. Procedimiento de Soldadura: Las platinas fueron soldadas utilizando el proceso de soldadura FCAW (ver Anexo A “Dossier de calidad de la Orden de Trabajo OT 042-13” y Figura 25) que es una de las más utilizadas dentro de la industria metalmecánica debido a su buena productividad, al buen acabado de los cordones de soldadura, su baja generación de escoria, y a que cumple con estándares de protección ambiental. Tanto el proceso de corte de planchas de acero como el proceso de soldadura se realizaron bajo los estándares de

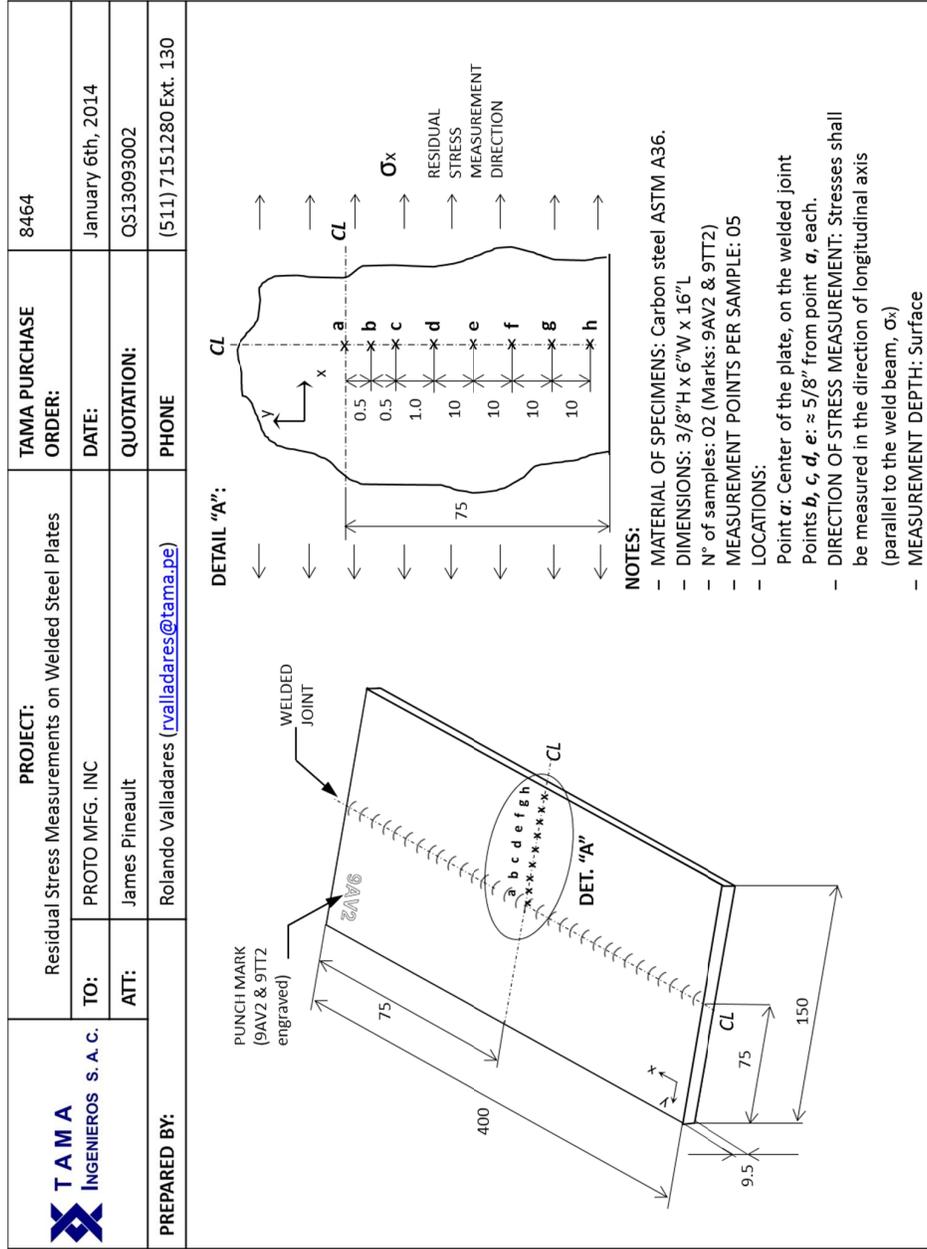
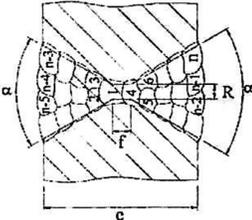


Figura 24. Distribución de los puntos de medición de esfuerzos residuales sobre las probetas de acero ASTM A36 para ensayo DRX.

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Pase o capa(s)	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (V)	Velocidad de avance (cm/min)	Detalles de la Junta
		Clase	Diam. (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)			
1 - 3(*)	FCAW	E71T-1	1.2	CC EP(+)	200-230	24.0-28	25-33	
4 - 6(*)	FCAW	E71T-1	1.2	CC EP(+)	200-230	24.0-28	25-33	
...	
(n-5) - (n-3)(*)	FCAW	E71T-1	1.2	CC EP(+)	200-230	24.0-28	25-33	
(n-2)-n (*)	FCAW	E71T-1	1.2	CC EP(+)	200-230	24.0-28	25-33	

(*) Se debe depositar 3 cordones de soldadura por un lado, luego soldar el lado posterior, así sucesivamente hasta terminar la costura

Figura 25. Parámetros utilizados para la soldadura de las probetas de acero de 9.5 mm de espesor.

seguridad y protección al medio ambiente reconocidos por la American Welding Society (2014)

d. Inspección: Una vez soldadas las probetas, se procedió a realizar la inspección visual y a ensayos de líquidos penetrantes para localizar discontinuidades (Figura 26).

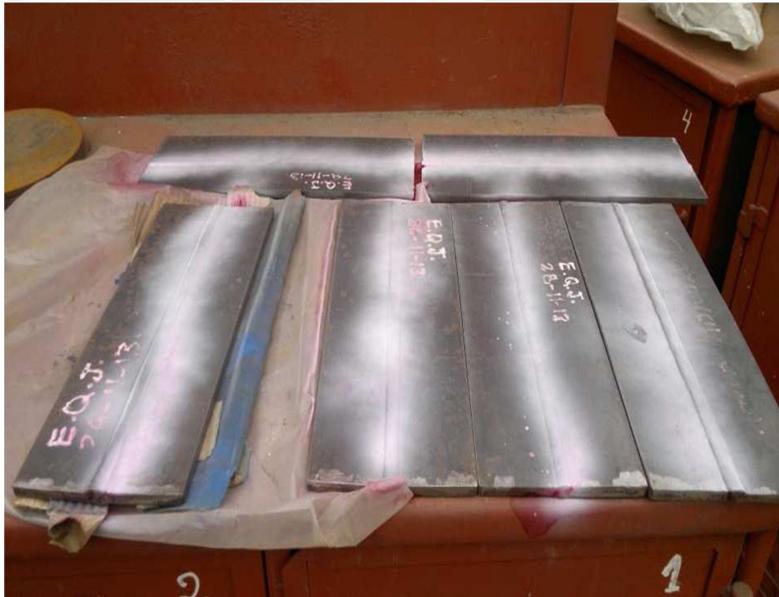


Figura 26. Probetas de acero de 9.5 mm de espesor durante ensayos no destructivos.

3.4. Registros de Trazabilidad del Proceso de Soldadura

Para asegurar la trazabilidad del proceso de soldadura de las probetas se elaboró un dossier de calidad del proceso incluyendo los siguientes registros:

- a. Plan de puntos de inspección (PPI)
- b. Registro de procedimientos de soldadura (WPS por sus siglas en inglés)
- c. Registro de calificación de procedimientos (PQR por sus siglas en inglés)
- d. Registro de calificación de soldadores (WPQ por sus siglas en inglés) que incluyó ensayos mecánicos de doblez y tracción
- e. Registro de recepción de material base
- f. Registro de recepción de materiales de aporte y consumibles
- g. Registro de control dimensional
- h. Registro de inspección de soldadura
- i. Registro de tintes penetrantes
- j. Acta de liberación final

El mencionado Dossier de calidad de la Orden de Trabajo OT N° 042-13 del fabricante TAMA INGENIEROS S.A.C. elaborado para la evaluación del proceso de alivio de tensiones MetaLax® forma parte de ésta investigación como Anexo A.

3.5. Primera medición de esfuerzos residuales por difracción de Rayos X

Los ensayos fueron desarrollados a las probetas 9AV2 y 9TT2 en el laboratorio de la firma Proto Mfg. con sede en la ciudad de Taylor, Michigan, en los Estados Unidos de Norteamérica, entidad que cuenta con la certificación ISO/EC 17025:2005 para operación de un sistema de gestión de calidad del laboratorio en medición de tensiones residuales mediante el método difracción de rayos X. Las mediciones estuvieron a cargo del Dr. James Pineault, Gerente de Laboratorio de Proto Mfg y se realizaron el 26 de marzo y el 7 de julio de 2014 (antes y después del tratamiento, respectivamente) y el equipo utilizado fue uno de la marca Proto modelo LXRD 11999, el mismo que se muestra en la Figura 27. Es importante resaltar que solo se realizaron mediciones de esfuerzos en dos probetas (9AV2 y 9TT2) principalmente por una restricción presupuestal puesto que la medición de esfuerzos en el laboratorio DRX tuvo un costo de US\$ 110.00 por cada punto evaluado. Las probetas 9AV1 y 9TT1 no fueron sometidas a estas mediciones y permanecieron en los talleres del fabricante TAMA INGENIEROS a la espera de posteriores mediciones.



Figura 27. Difractómetro de laboratorio LXRD 11999 con probeta 9AV2

3.6. Distribución de los Puntos de Medición de Esfuerzos Residuales

Los puntos en los cuales fueron evaluados los esfuerzos residuales antes y después de cada tratamiento de alivio de tensiones estuvieron distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 2. Distribución de los puntos de medición de esfuerzos residuales

Punto	a	b	c	d	e	f	g	h
Distancia al pie del cordón de soldadura (mm)	0	0.5	1	2	12	22	32	42
Profundidad	0.5 mm							
Dirección de la medición de los esfuerzos	Los esfuerzos residuales fueron medidos en la dirección del eje longitudinal o paralelos al cordón de soldadura, σ_x							

3.7. Electropulido de Probetas

Este proceso fue necesario ya que en la primera medición de esfuerzos residuales a las probetas 9AV2 y 9TT2 en EEUU en marzo de 2014 se midieron las tensiones residuales sobre la superficie externa natural de las probetas, y como resultado de ello se detectaron esfuerzos de compresión a lo largo de la línea transversal de medición (Figura 28). Los esfuerzos de compresión medidos en esta primera instancia podrían deberse a un proceso de enfriamiento súbito en la superficie, a golpes superficiales que pudieron realizarse durante el manipuleo de las probetas y envío hacia EEUU por vía aérea, o por los esfuerzos residuales resultantes del enfriamiento no uniforme después del laminado de la plancha de la cual se obtuvo el metal base. A la luz de estos resultados iniciales se determinó en conjunto con el Dr. James Pinault del Laboratorio Proto Mfg. que era necesario someter las muestras a un proceso de electropulido por electroerosión con el objeto de eliminar la capa superficial de material y dejar al descubierto una superficie interna libre de tensiones normales de compresión (Figura 29). El espesor de la capa eliminada fluctuó entre 0.485 mm y 0.541 mm (Figura 30). Luego de ello recién se pudo realizar la medición de esfuerzos residuales en estado natural libres de esfuerzos normales a la superficie.

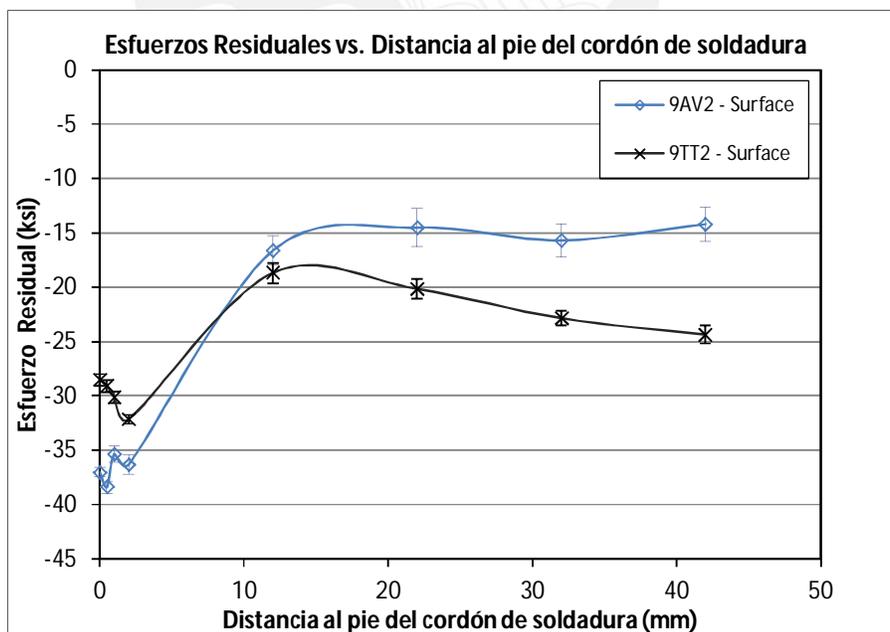


Figura 28. Resultados de la primera medición de esfuerzos residuales medidos sobre la superficie (Profundidad = 0 mm).



Figura 29. Proceso de electropulido en Laboratorio.



Figura 30. Detalle de zona electropulida en probetas (0.5 mm profundidad).

3.8. Sistema de Alivio de Tensiones por Vibraciones Subarmónicas

El sistema inductor de vibraciones utilizado para el estudio es de marca MetaLax® fabricado por Bonal Technologies Inc., modelo 2420, de uso difundido para aplicaciones en soldadura, forja y otros procesos de manufactura que generan tensiones residuales sobre el material de trabajo. El sistema consta de tres elementos principales las mismas que se muestran en la Figura 31:

1. Una consola de control electrónico, desde la cual se programa la intensidad y frecuencia de vibrado

2. Un acelerómetro, que permite medir la magnitud de vibración de la pieza de trabajo y traducirla en una señal electrónica visible a través de la consola.
3. Un Inductor de fuerza, que es un motor de 5/8 HP con una carga excéntrica regulable con capacidad para hacer vibrar cuerpos de hasta ocho toneladas de peso.



Figura 31. Sistema de Alivio de Tensiones Residuales por Vibraciones: (1) Panel de control electrónico, (2) Acelerómetro, (3) Motor inductor de vibraciones.

Las características de fuerza, frecuencia, y tiempo de vibrado se determinaron de acuerdo al manual de operación del fabricante del equipo y se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Tiempos de proceso del alivio de tensiones para piezas de acero al carbono según fabricante del equipo.

Peso de la pieza a tratar (Material: Acero de bajo carbono)	Tiempo (min)
0 a 90 kg	15
90 a 2,270 kg	20
2,270 a 4,540 kg	25
4,540 kg a más	30

Fuente: Bonal Technologies Inc. (2010)

3.9. Procedimiento de Alivio de Tensiones por Vibraciones Subarmónicas

Dos de los cupones de 9.5 x 150 x 400 mm identificados como 9AV1 y 9AV2 fueron sometidos al proceso de alivio de tensiones residuales post-soldadura haciendo uso del sistema de vibrado MetaLax®.

- a. Utilizando mordazas de tornillo se fijaron cada una de las dos probetas soldadas a una viga H10" x 54# x 2,198 mm con el objeto de utilizar a esta última como estructura principal sometida a alivio de tensiones y replicando el arreglo utilizado en el experimento realizado por *The National Shipbuilding Research Program* (1990) y que se muestra en la Figura 33.
- b. Se montó el inductor de vibraciones sobre la viga así como el acelerómetro que mide la frecuencia y amplitud de las vibraciones.
- c. Se determinaron los parámetros de tiempo y frecuencia a los cuales fue sometido el conjunto de elementos estructurales de acuerdo al material y peso del mismo siguiendo las instrucciones del Manual de Operación del fabricante del equipo de vibrado (Bonaf Technologies Inc., 2010)
- d. Por medio de la consola de control del equipo se visualizó la curva armónica del conjunto viga-probetas antes del vibrado y su frecuencia natural inicial, esto permitió determinar el rango de vibración subarmónica a la que fue vibrado dicho conjunto. La frecuencia subarmónica es aquella a la cual corresponde una amplitud equivalente a 1/3 del primer pico armónico del conjunto.
- e. Se hizo vibrar el arreglo durante 20 minutos (según datos de la Tabla 3) y se midió la frecuencia después del primer periodo de vibrado. Se visualizó un leve desplazamiento en la curva armónica (a) de la Figura 32.
- f. Se realizó un segundo proceso de vibrado bajo los mismos parámetros de amplitud y frecuencia, y se volvió a medir la frecuencia después del segundo periodo de vibrado. En la Figura 32 se detalla el registro gráfico del traslado de curvas armónicas. Las curvas (b), (c), y (d) fueron las obtenidas durante un proceso de vibrado de diez minutos cada una mientras no se alcanzara una variación dentro del rango de frecuencias de ± 0.8 de acuerdo al procedimiento establecido por Bonaf Technologies (2010), estado que fue alcanzado luego del quinto periodo de vibración de 10 minutos, representado por la curva (e) que denota el estado final de la curva armónica y la culminación del proceso de alivio de tensiones.
- g. Se contrastaron las nuevas curvas y frecuencias naturales obtenidas tras el penúltimo y último vibrado (Curvas (d) y (e) de la Figura 32). Al no existir más desplazamientos de la curva armónica fuera del rango recomendado por el fabricante del equipo (± 0.8), se dio por finalizado el proceso. El desplazamiento de las curvas armónicas es señal de la liberación de energía a nivel microestructural que redundará en menores esfuerzos residuales.

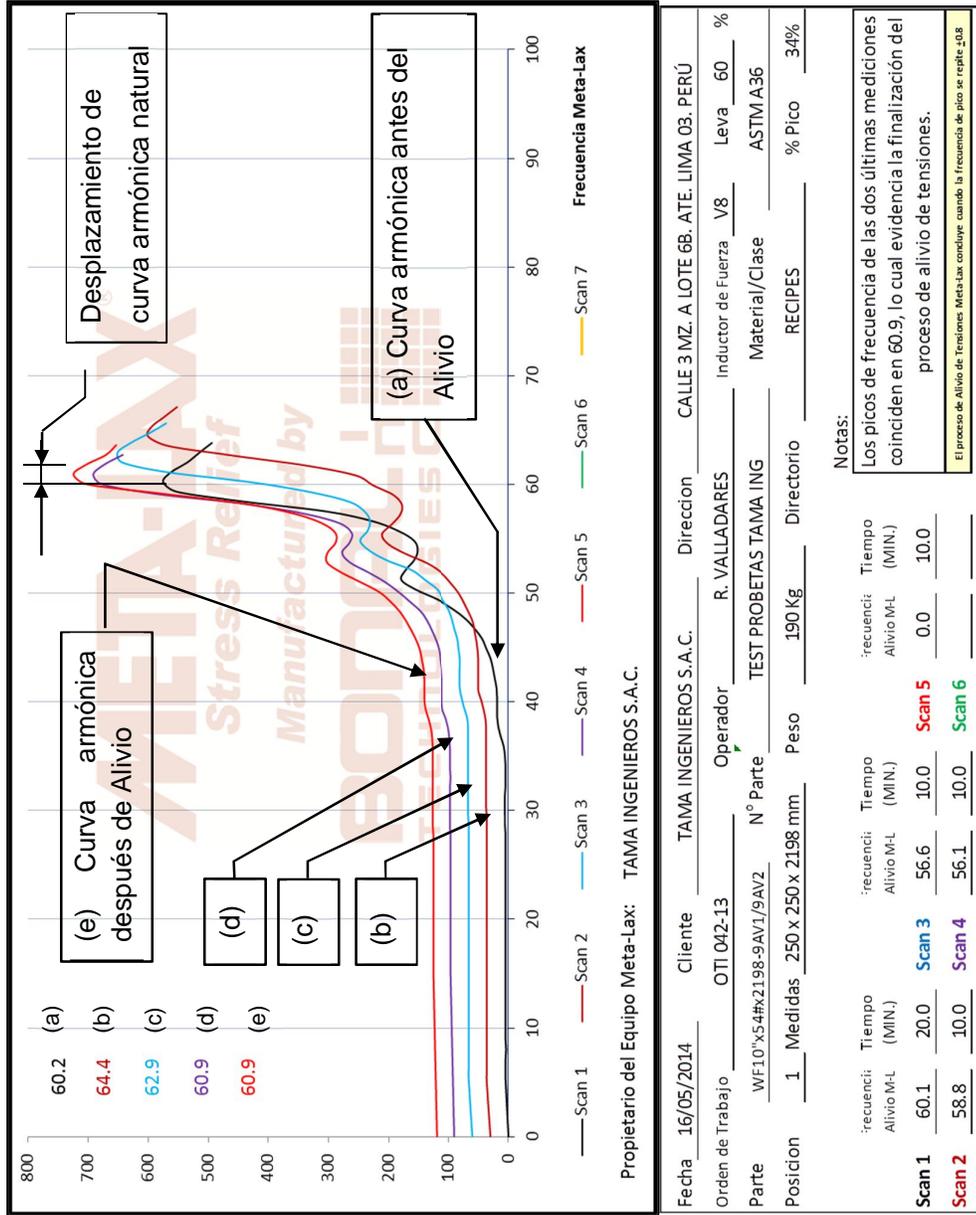


Figura 32. Registro gráfico del traslado de curvas armónicas. (a) antes del alivio; (b), (c), (d) durante el proceso, (e) después del proceso.

Finalmente, el proceso de vibración subarmónica estuvo compuesto por un periodo de 20 minutos seguido de cuatro periodos adicionales de diez minutos cada uno, sumando en total 60 minutos. De ambas probetas, retornó la 9AV2 para la medición de sus esfuerzos residuales con DRX en Michigan mientras que la probeta 9AV1 permaneció en los talleres del fabricante para estudios posteriores.

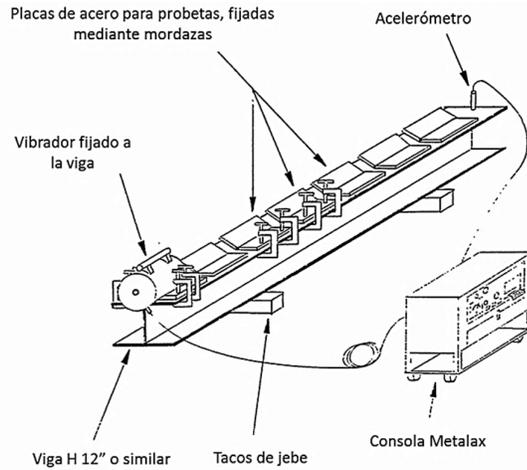


Figura 33. Modelo para alivio de tensiones por vibraciones post-soldadura.

Fuente: The National Shipbuilding Research Program (1990, p.54)



Figura 34. Arreglo para alivio de tensiones en taller el 16 de mayo del 2014.

3.10. Procedimiento de Alivio de Tensiones por Tratamiento Térmico

Considerando el tipo de aleación y su geometría, las probetas que se sometieron a alivio de tensiones por tratamiento térmico (9TT1 y 9TT2) fueron calentadas hasta una temperatura uniforme en un rango de 550°C a 650°C por un lapso de una hora para ambas probetas, asimismo el enfriamiento fue lento al interior del horno a una gradiente entre 6°C a 15°C por hora. El proceso fue encargado a la empresa Aceros del Perú S.A.C. y de ambas probetas, se seleccionó a la 9TT2 para su medición de esfuerzos residuales con DRX mientras que la probeta 9TT1 permaneció en los talleres del fabricante en espera de estudios posteriores.

3.11. Segunda medición de esfuerzos residuales por difracción de Rayos X

Las probetas 9AV2 y 9TT2 retornaron desde Lima al laboratorio de Proto Mfg. en Michigan en julio de 2014 para la realización de la segunda medición de esfuerzos residuales, luego de haber sido sometidas a los procesos de alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas y por tratamiento térmico cada una de ellas. Las diferencias entre los resultados antes y después de cada tratamiento se muestran en el reporte de la Figura 35 y se analizan y discuten en el Capítulo IV.

Form 132 - Standard Summary Report - Residual Stress

Proto Manufacturing Inc.

TAMA - 14004T

Setup Parameters:

Target: Cr (Ka avg 2.291 Angstroms)
 Target Power: 30 kV, 25 mA
 Gain Material: β Titanium Shim
 Gain Power: 17 kV, 25 mA
 Filters: none
 Material: Steel (Ferritic)
 X-Ray Elastic Constant: 24,500 ksi
 Crystallographic Plane: {211}
 Bragg Angle (2 θ): 156.41°
 Aperture: 1 mm
 Powder Correction: No
 Autoremove Bad Points: No
 Psi Tilts: 22
 Tilts: (0, \pm 30.00, 24.80, 19.29, 11.80, 5.55)

Oscillation(s): Beta 4.00°
 Collection Time: 0.5 seconds x 20 exposures
 Total Collection Time: 4 minutes 06 seconds
 Peak Fit: Gaussian 85%
 Two Peak Model: No
 LPA Correction On: Yes
 Gain Correction: P/G(s)
 Background Subtraction: Linear
 Peak Shift Method: Absolute Peak
 Psi Zero Assignment: Curve Fit Linear
 Instrument: LXRD 11999
 Software Version: 2.0 Build 87
 Goniometer Configuration: Psi

Date: 7/7/2014
 ASTM E 915:
 Operator: Tom Simmons

	Stress (ksi)	Error (ksi)
1	-0.0	\pm 0.3
2	-0.4	\pm 0.3
3	-0.0	\pm 0.4
4	-1.4	\pm 0.2
5	-0.8	\pm 0.4
Average:	-0.5	\pm 0.3
Standard Deviation:		\pm 0.6

Surface Measurements on Two (2) Steel Plates
 Locations as Indicated by TAMA Parallel to Weld (See Image Below)

Distance from Weld Toe (mm)	9AV2			9TT2			Change in Stress Due to Treatment	
	Depth (mm)	9AV2 Before Heat Treat Stress (ksi)	9AV2 After Heat Treat Stress (ksi)	Depth (mm)	9TT2 Before Heat Treat Stress (ksi)	9TT2 After Heat Treat Stress (ksi)	9AV2 Absolute Value of Change in Stress (ksi)	9TT2 Absolute Value of Change in Stress (ksi)
0.0	0.485	+29 \pm 2	+19 \pm 2	0.559	+26 \pm 1	+4 \pm 1	9 \pm 3	22 \pm 1
0.5	0.511	+16 \pm 1		0.485	+23 \pm 1			
1.0	0.498	+24 \pm 1	+22 \pm 2	0.505	+27 \pm 1	+1 \pm 1	1 \pm 3	25 \pm 2
2.0	0.523	+27 \pm 2	+26 \pm 2	0.561	+39 \pm 1	+6 \pm 1	1 \pm 3	33 \pm 2
12.0	0.541	+11 \pm 2	+6 \pm 3	0.503	+26 \pm 2	+1 \pm 1	5 \pm 4	25 \pm 2
22.0	0.541	+8 \pm 1	+3 \pm 2	0.480	-2 \pm 1	-3 \pm 2	5 \pm 2	1 \pm 2
32.0	0.523	-15 \pm 2	-11 \pm 2	0.503	-8 \pm 2	-1 \pm 1	4 \pm 3	7 \pm 2
42.0	0.498	-17 \pm 1		0.500	-13 \pm 1			
Average Change in Stress (ksi)							4 \pm 3	19 \pm 2

Note: "+" sign indicates tension, "-" sign indicates compression

Gabe Grodzicki
 James Pineault

Date: 7/7/2014
 Date: 7/7/2014

This laboratory is accredited for testing in accordance with the recognized International Standard ISO/IEC 17025:2005 by P.J.L.A accreditation #71619. This accreditation demonstrates technical competence for a defined scope and the operation of a laboratory quality managements system refer joint ISO-ILAC-IAF Communiqué date January 2009.

Figura 35. Reporte estándar de medición de esfuerzos residuales del Laboratorio Proto Mfg, Michigan, USA.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis que se detalla en ésta sección se hace en base a los resultados obtenidos luego de las mediciones de esfuerzos residuales en dos probetas: 9AV2 sometida a alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas y 9TT2 sometida a un proceso de tratamiento térmico de alivio de tensiones.

4.1. Análisis de Resultados

Los resultados de la medición bajo la metodología DRX fueron emitidos en el reporte estándar de medición de esfuerzos residuales N° 14004T del Laboratorio Proto Mfg (Figura 35) y para efectos de esta investigación se tabularon según el proceso de alivio de tensiones al que fueron sometidas las probetas tal como se muestra en la Tabla 4. De este modo se logró comparar, para un mismo espesor de probeta, los valores de esfuerzos residuales con y sin tratamiento de alivio de tensiones los mismos que luego se graficaron de acuerdo al modelo sugerido en la Figura 22 por Prohaszka *et al.* (1974). Todas las mediciones se realizaron a un promedio de 0.5mm por debajo de la superficie de cada probeta, previo proceso de electroerosionado.

Tabla 4. Registro de mediciones de esfuerzos residuales para probetas de 9.5mm

Distancia al pie del cordón soldadura (mm)	Probeta 9AV2 (Vibraciones Subarmónicas)			Probeta 9TT2 (Tratamiento Térmico)		
	Profundidad (mm)	Tensión Residual antes (ksi)	Tensión Residual después (ksi)	Profundidad (mm)	Tensión Residual antes (ksi)	Tensión Residual después (ksi)
0.0	0.485	+29 ± 2	+19 ± 2	0.559	+26 ± 1	+4 ± 1
0.5	0.511	+16 ± 1	N/D	0.485	+23 ± 1	N/D
1.0	0.498	+24 ± 1	+22 ± 2	0.505	+27 ± 1	+1 ± 1
2.0	0.523	+27 ± 2	+26 ± 2	0.561	+39 ± 1	+6 ± 1
12.0	0.541	+11 ± 2	+6 ± 3	0.503	+26 ± 2	+1 ± 1
22.0	0.541	+8 ± 1	+3 ± 2	0.480	-2 ± 1	-3 ± 2
32.0	0.523	-15 ± 2	-11 ± 2	0.503	-8 ± 2	-1 ± 1
42.0	0.498	-17 ± 1	N/D	0.500	-13 ± 1	N/D

N/D: No se recopilaron datos en la segunda medición (después del tratamiento de alivio)

Como se puede apreciar en la Tabla 4, en el pie del cordón de soldadura de la probeta aliviada por medio de vibraciones subarmónicas 9AV2 (punto "0.0") se midió un esfuerzo de tracción residual de 29 ksi antes y de 19 ksi después del proceso de alivio, es decir un 34.5% de reducción en la magnitud de la tensión

residual. Sin embargo sobre la misma probeta en el punto "1.0" se midió un esfuerzo de tracción residual de 24 ksi sin alivio y de 22 ksi después del proceso de alivio de tensiones. De forma similar, en el punto "2.0" los valores de tensión residual fueron de 27 y 26 ksi, antes y después del alivio, respectivamente. En ambos puntos se observa que las variaciones no fueron significativas pues se encuentran por debajo del error de medición del difractómetro (+/- 2 ksi).

También se pudo observar que, luego de la reducción de la tensión en el centro del cordón "0.0", el punto "2.0" es un pico máximo que representa un entalle metalúrgico en la probeta 9AV2. De forma similar, en la probeta 9TT2 sometida a tratamiento térmico, en la ubicación "2.0" se midió un esfuerzo de tracción residual de 39 ksi sin alivio y de 6 ksi después del proceso de alivio de tensiones. De aquí se desprende que para ambas probetas el punto "2.0" se convierte en el pico más crítico después de los correspondientes procesos de alivio de tensiones en cada probeta.

Del mismo modo, se notó que en ambas probetas, a partir del punto "12" –a 12mm de distancia del pie de la soldadura- la reducción en la magnitud de los esfuerzos residuales, tanto en tracción como en compresión, es más evidente. Así por ejemplo, en el punto "12.0" de la probeta 9AV2 la disminución en la magnitud es de 45% aproximadamente (de 11 ksi a 6 ksi).

Debido a que los puntos "1.0" y "2.0" mostraron una baja correlación con los demás puntos medidos en la probeta sometida a alivio de tensiones por vibraciones se observó la necesidad de realizar un barrido de mediciones adicionales desde el pie de la soldadura hasta el punto "5.0" en intervalos de 0.5mm a fin de corroborar si alrededor de ambos puntos ha existido o no una disminución significativa de los esfuerzos residuales de tracción. Para estas diez mediciones adicionales la principal restricción fue presupuestaria puesto que cada evaluación en el laboratorio DRX tiene un valor de US\$ 110.00 lo que hubiese implicado una inversión adicional de aproximadamente US\$ 1,100.00. Precisamente la limitación presupuestaria obligó a reducir el número de puntos entre la primera y la segunda medición (antes y después de los procesos de alivio) por lo cual se prescindió de las mediciones en los puntos "0.5" y "42.0" cuyas mediciones se muestran como "N/D" en la Tabla 4.

También podría realizarse un decapado de 0.5 mm adicionales (es decir, a 1.0 mm de profundidad) y realizar un barrido de mediciones DRX para comprobar si el perfil de esfuerzos es acorde con el levantado en este primer conjunto de mediciones.

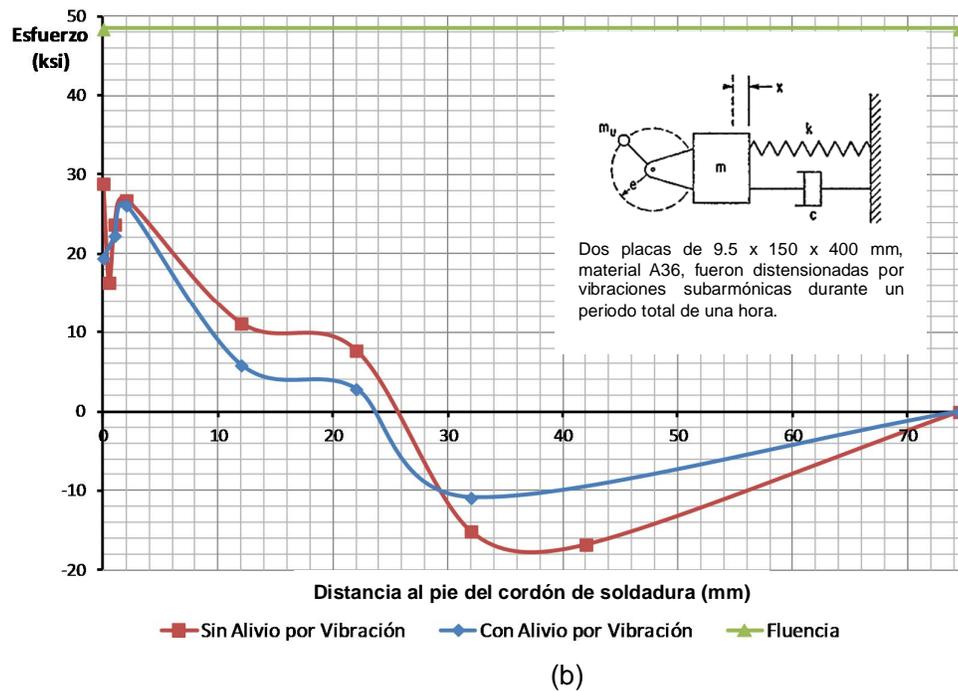
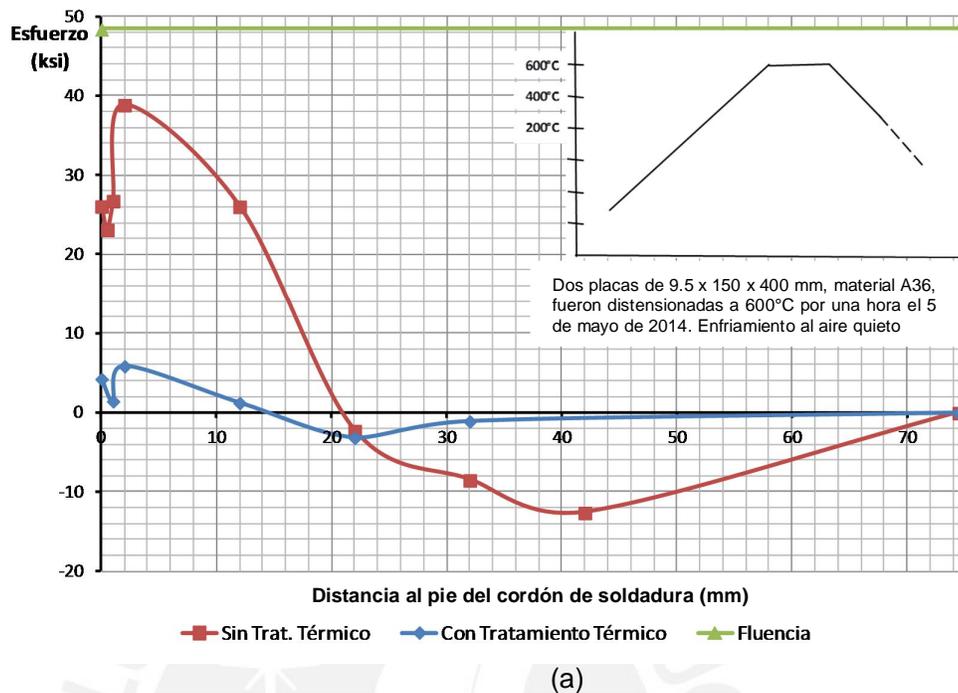


Figura 36. Registro gráfico comparativo de Esfuerzo residual versus Distancia al pie de la soldadura: (a) Antes y después del tratamiento térmico (b) Antes y después del Alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas.

4.2. Cálculo de emisión de gases contaminantes

De acuerdo al procedimiento experimental descrito en la sección 3.9, el proceso de vibraciones subarmónicas duró 60 minutos, y considerando que el motor del inductor de vibraciones consume 0.47 KW, el consumo de energía eléctrica fue de 0.47 KW-hr. Por su parte, haber sometido el arreglo de la Figura 33 de aproximadamente 200 kg a un tratamiento térmico de alivio de tensiones durante una hora hubiera demandado un consumo de 0.07 kg de GLP de acuerdo a la estimación de Auces y Rodríguez (2003) que se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Consumo de GLP para Tratamiento Térmico

Calor requerido para calentar pieza de 50 Ton	792,371.20	kJ/Hr
Calor requerido para calentar pieza de 0.2 Ton (200 kg)	3,169.48	kJ/Hr
Poder calorífico inferior promedio GLP	46,120.00	kJ/kg
Cantidad GLP (hr)	0.07	kg/Hr

Un análisis teórico comparativo relativo al impacto que los métodos de alivio de tensiones ocasionó sobre el medio ambiente revela que por cada hora de tratamiento térmico de alivio de tensiones residuales se generaron 0.20 kg de CO₂, (por cada hora de tratamiento térmico con una manta térmica se habrían generado 0.23 kg de CO₂ solo considerando el calor para la elevación hasta 650°C y mantenerla por una hora) versus 0.13 kg de CO₂ emitidos por el motor eléctrico inductor de vibraciones de 5/8 HP de potencia nominal utilizado en este estudio. Nótese que solo se considera en calor absorbido por el arreglo de Viga H de 200kg de peso mas no se incluyen las pérdidas de calor por paredes de horno, el calor perdido en la chimenea por los gases de combustión ni el calor perdido por las aberturas del horno. Considerarlos incrementará el valor estimado de GEI emitidos durante el tratamiento térmico de relevo de tensiones.

Tabla 6. Tabla Comparativa de Emisión de GEI

Consumo energético	Factor de Emisión*	Cantidad	GEI kg CO ₂
Horno GLP genérico (kg)	2,96 kg CO ₂ /kg de GLP genérico	0.07 kg GLP/hr	0.20
Consumo teórico manta eléctrica (kWh)	0.267 kg de CO ₂ /kWh	0.85 kw.hr	0.23
Inductor eléctrico de vibración (kWh)	0.267 kg de CO ₂ /kWh	0.47 kw.hr	0.13

(*) Fuente: Oficina Catalana de Cambio Climático (2011).

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan cuatro conclusiones resultantes de estudio experimental realizado en dos probetas (una por cada tipo de alivio de tensiones) y once recomendaciones. Si bien los resultados obtenidos no son escalables debido al tamaño de la muestra analizada, establecen oportunidades de desarrollo para estudios posteriores que generen conclusiones aplicables a un mayor número de casos.

5.1. Conclusiones

Los resultados experimentales obtenidos luego de la medición de esfuerzos residuales mediante difracción de rayos X en la probeta 9AV2 sometida a alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas y en la probeta 9TT2 sometida a tratamiento térmico mostraron:

- a. Que en la probeta sometida al proceso de alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas se produjeron reducciones de tensiones residuales longitudinales cuyas magnitudes no fueron equiparables con aquellas reducciones resultantes en la probeta sometida al proceso de tratamiento térmico de alivio de tensiones. Por tanto, dentro del alcance de ésta aplicación experimental comparativa entre los dos métodos, el alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas no puede ser considerado como una alternativa al tratamiento térmico.
- b. Que en ambas probetas el entalle metalúrgico se ubicó a la misma distancia transversal desde el pie de la soldadura (2 mm aproximadamente, medida en forma perpendicular al eje de la soldadura).
- c. Que existieron puntos cercanos al entalle metalúrgico en la probeta aliviada por vibraciones subarmónicas en los que la reducción de tensiones no fue significativa. Sin embargo también hubieron puntos más alejados de dicho entalle en los que se registraron reducciones en las magnitudes de las tensiones residuales de hasta 45%.
- d. Que en el caso de la probeta soldada sometida a tratamiento térmico, la reducción en la magnitud de los esfuerzos residuales longitudinales de tracción fue de 85% en el entalle metalúrgico.

5.2. Recomendaciones

Las recomendaciones que se describen a continuación pretenden servir de guía para estudios posteriores que permitan profundizar el conocimiento acerca de los métodos de alivio de tensiones mediante vibraciones.

- a. Se debe realizar un mayor número de mediciones en más puntos sobre ambas probetas a fin de corroborar si alrededor del entalle metalúrgico ha existido o no una disminución significativa de los esfuerzos residuales de tracción luego del proceso de alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas.
- b. Es necesario realizar un mayor número de mediciones a diferentes niveles de profundidad a lo largo del espesor de cada probeta evaluada a fin de corroborar si la magnitud promedio de los esfuerzos residuales ha disminuido significativamente luego del proceso de alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas ya que los ensayos fueron realizados a un solo nivel de profundidad (0.5 mm), lo cual no permite extrapolar los resultados experimentales a toda la pieza.
- c. Debido a que las vibraciones subarmónicas no produjeron efecto negativo alguno sobre la probeta soldada analizada es posible recomendar la aplicación de éste proceso como complemento al tratamiento térmico. Esta recomendación se refuerza con la afirmación de Hebel (1997) quien sostuvo que si por alguna razón se necesita la aplicación del tratamiento térmico para la modificación de las propiedades mecánicas, se apliquen vibraciones subarmónicas antes del tratamiento térmico a fin de reducir las distorsiones dimensionales que normalmente suceden durante el proceso de calentamiento.
- d. Se debe complementar los ensayos realizados con otros de tracción y dureza a fin de comprobar que no ha existido alteración de las propiedades mecánicas del metal base al no haberse producido alteraciones microestructurales por efecto térmico.
- e. Si bien se concluye que el tratamiento de alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas no es un método alternativo al tratamiento térmico sino más bien complementario, a lo largo del proceso experimental se encontró que el costo por kilogramo del tratamiento de alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas fue casi la sexta parte del costo por kilogramo del tratamiento térmico en horno (Figura 37). Cabe resaltar que para efectos de ésta comparación no fueron tomadas en cuenta alternativas térmicas como las mantas, sopletes de acetileno, o de calentamiento por inducción magnética.

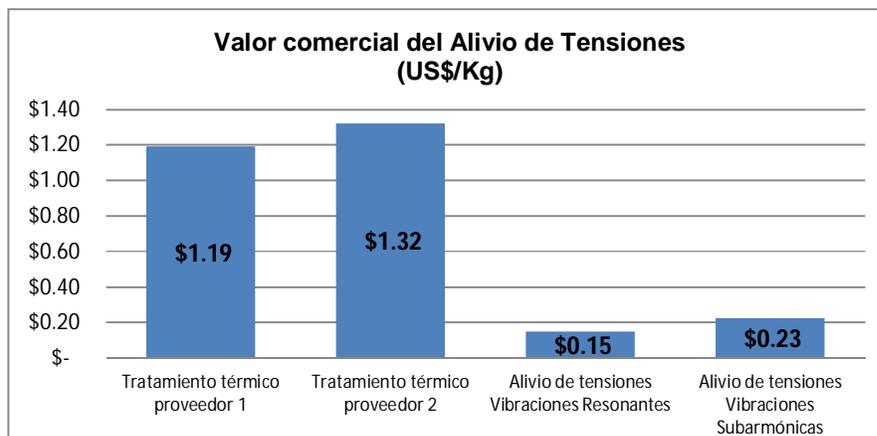


Figura 37. Valor comercial del Alivio de Tensiones (US\$/Kg).

Notas:

- (*) Precio de tratamiento térmico para estructura soldada de 1034 mm (L) x 1341mm (W) x 325 mm (H), 450Kg, Material: A-36
- (**) Precio de Alivio de Tensiones por Vibraciones Resonantes para estructura de 2745 (L) x 1422 (W) x 1310 (H) MM, 1479 Kg, Material A-36, obtenido mediante cotizaciones de mercado, año 2014.
- (***) Costo referencial del Alivio de Tensiones mediante vibraciones subarmónicas procesando 60Ton/año durante dos años.

- f. Es necesario realizar experimentos adicionales para cuantificar la efectividad del tratamiento de alivio por vibraciones subarmónicas en otros tipos de unión soldada (por ejemplo, en uniones soldadas en filete).
- g. Se recomienda ampliar los estudios a fin de reducir la incertidumbre tecnológica existente. Los resultados experimentales obtenidos servirán de referencia básica y podrán ser replicados siguiendo la metodología propuesta en el Capítulo III, sin embargo, debido a que no siempre será posible controlar todas las variables que influyen en el proceso de soldadura, también podría verse afectado su escalamiento comercial. Para reducir el nivel de incertidumbre estadística, el número de muestras y puntos de medición por DRX deberá ser muy grande si se desea abarcar la mayor cantidad de aplicaciones de soldadura existentes en el sector metalmecánico.
- h. Se recomienda explotar oportunidades para estudios posteriores: Es necesario validar una metodología de alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas debido a que es un proceso utilizado hace varios años en el mercado internacional pero que actualmente no se encuentra normalizado ni regulado por ninguna entidad. A pesar de que es una tecnología con más de cuarenta años de desarrollo, tampoco existen resultados experimentales que permitan predecir con certeza la magnitud de la reducción de los esfuerzos residuales tras su aplicación en estructuras soldadas de acero al carbono. La oportunidad que genera este estudio para validar la metodología de alivio de tensiones

residuales mediante vibraciones subarmónicas radica en que, una vez validada experimentalmente, la industria metalmecánica se podría beneficiar de sus menores costos, los menores tiempos de proceso, los menores riesgos de distorsiones dimensionales post-calentamiento, de alteración de las propiedades mecánicas y de la pérdida de rigidez de las estructuras, además de reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

- i. A partir de éste estudio surge la oportunidad para simular el efecto de las vibraciones subarmónicas mediante métodos de elementos finitos que permitan predecir una aproximación a los esfuerzos y deformaciones residuales, con el propósito de emplear los resultados para prever el efecto en la reducción de las tensiones mediante este proceso.
- j. Se recomienda explotar las oportunidades para continuar investigando la metodología de alivio por vibraciones subarmónicas: El posterior desarrollo y validación de una metodología de alivio de tensiones mediante vibraciones permitirá impulsar la demanda de éste proceso pues será posible evidenciar a los usuarios que existe la necesidad de realizar este tipo de tratamientos a toda estructura soldada que requiera de una alta precisión dimensional. En ese sentido, las oportunidades de desarrollo de la metodología serán las siguientes:
 - Oportunidad de obtener en el largo plazo un universo de resultados experimentales lo suficientemente amplio como para establecer una norma técnica peruana para la aplicación de tratamientos de alivio de tensiones mediante vibraciones.
 - Establecer un precedente para la realización del proceso de alivio de tensiones en uniones soldadas de aceros especiales sumándose al creciente desarrollo tecnológico en el ámbito de las soldaduras de vanguardia.
- k. A lo largo del desarrollo de esta investigación fue posible evidenciar que en el medio industrial peruano aún existe:
 - Desconocimiento sobre los métodos alternativos para el alivio de tensiones residuales.
 - Falta de una metodología científica que delimite la magnitud hasta la cual pueden reducirse los esfuerzos residuales cuando se aplica un proceso de alivio de tensiones diferente al tratamiento térmico.
 - Desconocimiento sobre los métodos de medición no destructiva de esfuerzos residuales en uniones soldadas.

Por lo que se recomienda reforzar las alianzas entre universidad y empresa que deriven en la reducción de éstas brechas.

Finalmente, se estima que el mercado metalmecánico está formado por un promedio de 2,000 empresas dedicadas a diversas actividades de transformación de metales. Sin embargo las empresas formales que se orientan en especial a la gran y mediana minería, capaces de cumplir con altos estándares de calidad, seguridad, certificaciones y homologaciones se estima un promedio de 50 a 100, las cuales podrían verse beneficiadas con el desarrollo de una aplicación como la analizada en esta investigación.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- American Welding Society. (1950). *Welding Handbook* (9 ed., Vol. 1). New York: American Welding Society Inc.
- American Welding Society. (2014). *Safety & Health Fact Sheets - N° 1 to 37*. Retrieved Junio 9, 2015, from <http://www.aws.org/technical/facts/>
- Asta, E. (2006). *Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico*. Buenos Aires: Fundación Latinoamericana de Soldadura.
- Auces, E., & Rodríguez, J. (2003). Cálculo de las Necesidades de Energía en un Horno de Relevo de Esfuerzos. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 3, 24, 2. Venezuela: Red Universidad de Los Andes.
- Bonal Technologies. (1998). *Research Summary*. Retrieved Febrero 25, 2013, from Summary of research data using Meta-Lax® Technology: <http://www.meta-lax.com/pdf/summary.pdf>
- Bonal Technologies Inc. (2010). *Operation Manual - Meta-Lax® Series 2400*. Royal Oak, MI.
- Bonal Technologies, Inc. (1999). *Woodward Governor Verifies Metalax Effectiveness*. Taylor, MI.
- Bouhelier, C., Barbarin, P., Deville, J. P., & Miege, B. (1988, Julio). Vibratory Stress Relief of Welded Parts. In L. Morfin (Ed.), *International Symposium on Mechanical Relaxation of Residual Stresses* (pp. 58-70). Cincinnati, Ohio: ASTM Committee E-28 on Mechanical Testing.
- Brockenbrough, R. L. (2011). *Properties of Structural Steels and Effects of Steelmaking and Fabrication*. Pittsburgh, Pennsylvania: Mc Graw Hill Education.
- Brundle, R., Evans, C., & Wilson, S. (1992). *Encyclopedia of materials characterization. Surfaces, Interfaces, Thin Films*. (Butterworth-Heinemann, Ed.)
- Bullón, W., Valverde, Q., Acosta, J., & Franco, R. (2007). *Simulación de Un Proceso de Soldadura Mediante un Modelo Termo - Mecánico Considerando el Efecto de Esfuerzos Residuales Utilizando el Método de los Elementos*

Finitos. Retrieved Junio 12, 2014, from <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/20/20-38.pdf>

Claxton, R., & Bentley, A. (1999, Mayo). Vibratory Stress Relief – Recent Developments. *Metallurgia*, 66(5), 49, 51, 53.

Connor, L. (1987). Welding Technology. In A. W. Society, *Welding Handbook* (pp. 219, 226-227). Miami: American Welding Society Inc.

Cullison, A. (2001). *Stress Relief Basics*. Retrieved Junio 8, 2015, from Welding Journal: <https://app.aws.org/wj/2001/09/0049/>

Dieter, G. (1988). *Mechanical Metallurgy* (SI Metric Edition ed.). (D. Bacon, Ed.) London, Singapore, Singapore: McGraw-Hill Book Company (UK) Limited.

Ezeilo, A., & Webster, G. (1999). Advances in Neutron Diffraction for Engineering Residual Stress Measurements. *Textures and Microstructures*, 33, 151-171.

Fosca, C. (2007). *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura*. Lima: Imprenta PUCP.

Harris, C. (1961). *Harris' shock and vibration handbook*. New York: McGraw-Hill.

Hayden, H., Moffatt, W., & Wolff, J. (1965). *The structure and properties of materials – Mechanical Behavior*. New York: Jhon Wiley and Sons, Inc.

Hebel, T. (1997). Reducing Stress Related Problems in Steel Forgings Using Sub-Harmonic Vibrational Energy. In E. Nisbett, & A. Melilli (Ed.), *Second Symposium on Steel Forgings*. 2, pp. 148-159. New Orleans, Louisiana: ASTM.

Hibbeler, R. (1999). *Mecánica Vectorial para Ingenieros - Estática* (7 ed.). México: Pearson Education - Prentice Hall.

Hornsey, J. (2006). *Residual Stresses: Their Causes, and the Effective Means of Treatment to Reduce the Residual Stresses and to Improve the Fatigue Life in Engineering Components*. Leraatsfontein: Vibratory Stress Relieving (Africa).

Hydratight Limited. (2016). *Servicios*. Retrieved Mayo 12, 2016, from Tratamiento térmico en sitio: <http://www.hydratight.com/es-mx/services/heat-treatment>

- Juy Aguirre, A. (2004, Mayo 19). *Influencia de las tensiones residuales de mecanizado en las propiedades mecánicas de Y-TZP*. Retrieved Junio 09, 2015, from Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6039>
- Kandil, F., Lord, J., Fry, A., & Grant, P. (2001). A Review of residual stress Measurement Methods-A guide to technique Selection. *National Physical Laboratory, 25-27*.
- Kraft, O., & Gao, H. (2005). *Chapter 8. Diffusion processes in advanced technological Materials*. William Andrew, Inc.
- Kudryavtsev, Y., Kleiman, J. G., Smilenko, V., & Brodovy, V. (2011). *Ultrasonic Technique and Device for Residual Stress Measurement*. Retrieved mayo 6, 2013, from Integrity Testing Laboratory Inc.: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:bDaM7zjwDbIJ:www.itlinc.com/pdf/33_Paper_on_UCC.pdf+&cd=1&hl=en&ct=clnk&gl=pe
- Lampman, S. (1997). *Weld Integrity and Performance: A Source Book Adapted from Asm International Handbooks, Conference Proceedings, and Technical Books*. Materials Park, OH: ASM International.
- Machado, I. (2002). *Tratamentos Térmicos e de Superfície*. Retrieved Febrero 28, 2013, from Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Depto. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos PMR: http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/Tratamento_termico_e_superficial.pdf
- Mesa, D. (2005). *Tratamiento térmico de los aceros*. Retrieved Febrero 28, 2013, from Universidad Tecnológica de Pereira. Área de Materiales y Procesos de Manufactura: <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/clase9ttteoria.pdf>
- Metal Improvement Company. (2010). *Shot Peening*. Retrieved Febrero 16, 2013, from http://www.metalimprovement.com/shot_peening.php
- Monsalve, M., López, M., & Galvis, F. (2007, Setiembre). Técnicas Utilizadas para la Medición de Esfuerzos Residuales en Películas Delgadas Depositadas por PDV. *Scientia et Technica, Año XIII(36)*, 765-770.

- Nitschke-Pagel, H. (2002). Residual Stresses in Welded Joints - Sources and Consequences. 404-407. Braunschweig, Germany. Retrieved from Materials Science Forum.
- Oficina Catalana de Cambio Climático. (2011). *Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*. Retrieved Mayo 4, 2015, from Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Cambio Climático:
http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/politiques/politiques_catalanes/la_mitigacio_del_canvi_climatic/guia_de_calcul_demissions_de_co2/120301_guia_practica_calcul_emissions_rev_es.pdf
- Palma, H. (2014, Febrero 27). *Sector metalmecánico mantendría su producción en el 2014*. Retrieved Octubre 3, 2015, from Diario El Comercio: <http://elcomercio.pe/economia/peru/sector-metalmecanico-mantendria-su-produccion-2014-noticia-1712647>
- Pereira, C. A., Morilla, J. C., Villani, P., & Delijaicov, S. (2012). Alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes. *UNISANTA - Science and Technology*, 1(2), 69-75.
- Petroperú. (2015, Junio 10). *Lista de Precios de Combustibles*. Retrieved Junio 09, 2015, from Precios Netos Petroperú: <http://www.petroperu.com.pe/PortalWeb/UpLoad/UpLoaded/PDF/COMB-21-2015.pdf>
- Prevéy, P. S. (1986). X-Ray Diffraction Residual Stress Techniques. *Metals Handbook*, 10, 380-392.
- Prohaszka, J., Hidasi, B., & Varga, L. (1974). *Vibration Induced Internal Stress Relief*. Retrieved Junio 12, 2015, from Institute for Technology and Materials Science Technical University Budapest: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:UN8PweIXdgJ:www.pp.bme.hu/me/article/download/5962/5067+&cd=2&hl=en&ct=clnk&gl=pe>
- Reséndiz, C. (2011, Abril). *Evaluación del Campo de Esfuerzos Residuales en Cilindros Sometidos a Presión Interna Aplicando el Método de Elemento Finito*. Retrieved Junio 14, 2015, from Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior De Ingeniería Mecánica y Eléctrica.:

<http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/14476/SEPI-ESIME-UA.pdf?sequence=1>

- Robbins, M. (2004, Diciembre). *The Vibratory Stress Relief Library*. Retrieved Junio 8, 2015, from VSR Technology Group: http://www.vsrtechnology.net/wp-content/uploads/robbins_michael.pdf
- Skinner, R. (1987). *An Investigation into the Theory Behind Sub-Resonant Stress Relieve*.
- Skoog, D., Holler, J., & Nieman, T. (2001). *Principio de Análisis Instrumental* (5ta ed.). Mc Graw Hill.
- The National Shipbuilding Research Program. (1990). *Fabrication Accuracy Through Distortion Control in Shipbuilding Panel SP-7. Report For Project 07-87*. Arlington, VA.: Ingalls Shipbuilding, Inc.
- Van Vlack, L. (1967). *Elements of materials Science*. United States of America: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Vishay Precision Group. (1993). *Measurement of residual stress by the hole drilling strain gage method, Technical Note TN503-4*. Retrieved Marzo 10, 2013, from Measurement Group, Wendell, NC: http://www.intertechnology.com/Vishay/pdfs/TechNotes_TechTips/TN-503.pdf
- William, D., & Callister, J. (2007). *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING: AN INTRODUCTION* (7 ed.). John Wiley & Sons.
- Wong, T., & Johnson, G. (1987). *Ultrasonic Evaluation of Nonlinearity of Metals from a Design Perspective*. Berkeley, CA: University of California.

ANEXOS

