



T A M A
INGENIEROS S. A. C.

Alivio de tensiones residuales mediante vibraciones subarmónicas en uniones soldadas de acero al carbono

Fundamentos y Resultados Experimentales

Lima, Setiembre del 2014

Rolando Valladares Valdivieso

Investigación y Desarrollo

TAMA INGENIEROS S.A.C.

rvalladares@tama.pe

ecardenas@tama.pe

(C) 992 706 507 | (T) 715-1280

Alivio de tensiones residuales mediante vibraciones subarmónicas en uniones soldadas de acero al carbono



Debido a los choques 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 su estructura cristalina, sus propiedades mecánicas, e incluso generan grietas y fisuras que ponen en riesgo la vida útil de una estructura metálica, sobre todo cuando ésta se encuentra sometida a esfuerzos de fatiga.

TAMA INGENIEROS S.A.C. se propuso evaluar el efecto que ejerce el proceso de alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas sobre las uniones soldadas de acero al carbono y compararlo contra el efecto de la aplicación del tratamiento térmico convencional de alivio de tensiones.

Alivio de tensiones residuales mediante vibraciones subarmónicas en uniones soldadas de acero al carbono



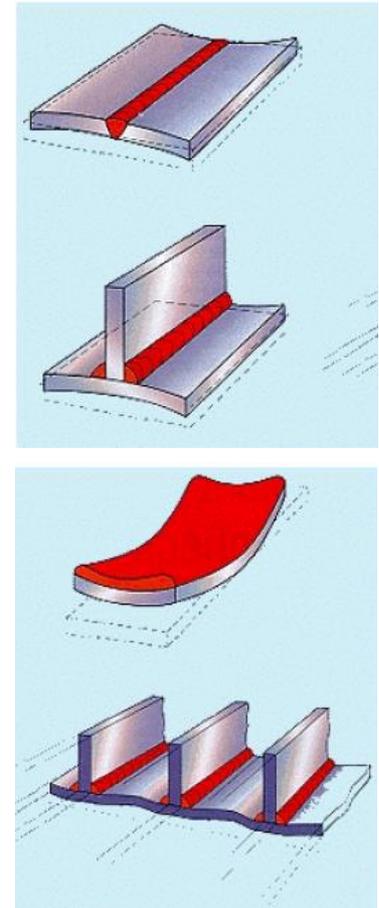
El procedimiento desarrollado por TAMA INGENIEROS S.A.C. para evaluar cuantitativamente el efecto de la aplicación del alivio de tensiones incluyó la medición de tensiones residuales mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX) en un laboratorio certificado, en Michigan, EEUU.

Los resultados experimentales obtenidos reportaron una reducción promedio de 33% en la magnitud del esfuerzo residual en el pico de máxima tensión mediante el proceso de vibraciones subarmónicas versus el 85% de reducción que se logra en el caso del tratamiento térmico.

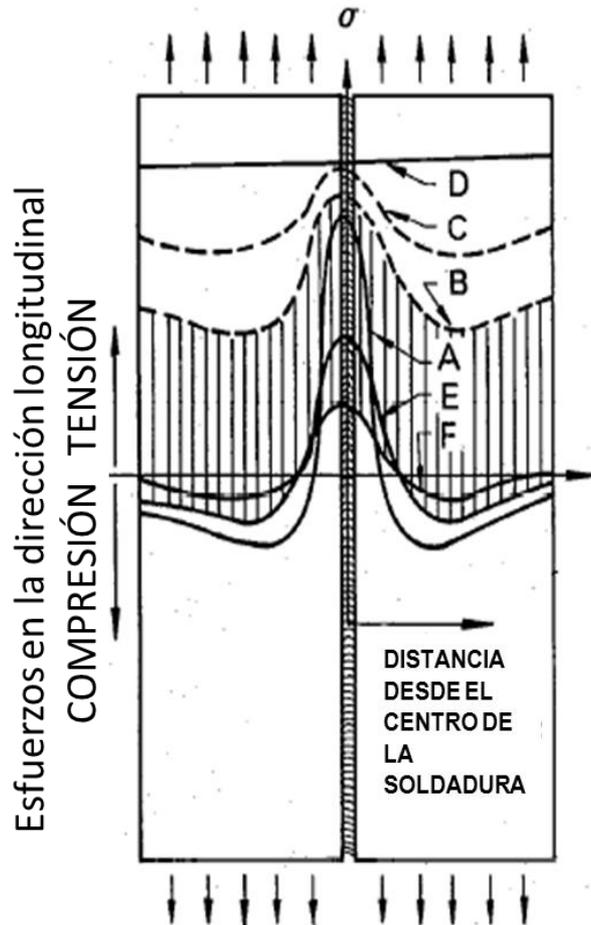
Esfuerzos residuales en Soldadura



- Estos esfuerzos son causados por el rápido calentamiento y enfriamiento del material base cerca a la fuente de calor que propicia la fusión.
- Los esfuerzos residuales en estructuras soldadas pueden reducirse o eliminarse por medio de dos tipos de método: térmicos y mecánicos.
 - ✓ Durante el tratamiento térmico de alivio de tensiones la pieza soldada es calentada hasta una temperatura a la cual el esfuerzo de fluencia del material baja a tal punto que el metal cede plásticamente y relaja sus tensiones internas.
 - ✓ Por su parte, los tratamientos mecánicos de alivio de tensiones también reducen las tensiones internas pero sin necesidad de alterar la microestructura, resistencia o dureza del cordón de soldadura o la Zona afectada por el calor (ZAC) adyacente.



Efecto de una carga externa uniforme sobre la distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada a tope (Connor, 1991).



Curva A Esfuerzos residuales en condición “tal como se soldó”

Curva B Distribución de esfuerzos a $\sigma = \sigma_1$

Curva C Distribución de esfuerzos a $\sigma = \sigma_2$

Curva D Distribución de esfuerzos en el punto de fluencia

Curva E Distribución de esfuerzos residuales después de que $\sigma = \sigma_1$ es aplicada y luego descargada.

Curva F Distribución de esfuerzos residuales después de que $\sigma = \sigma_2$ es aplicada y luego descargada.

Nótese que $\sigma_2 > \sigma_1$

Tratamientos Mecánicos de Alivio de Tensiones mediante Vibraciones (ATV)



Se basan en la inducción dentro del metal de energía vibratoria para hacer que las moléculas se reacomoden de tal forma que permitan relevar los esfuerzos residuales existentes dentro de la pieza, especialmente aquellos producidos por cambios súbitos de temperatura propios de algunos procesos de manufactura: soldadura, forja, laminación, mecanizado, esmerilado, etc.

Esta energía cinética vibratoria es inducida a la pieza por medio de un sistema inductor de fuerzas de tracción/compresión que se aplican de forma cíclica en el tiempo (vibrador).

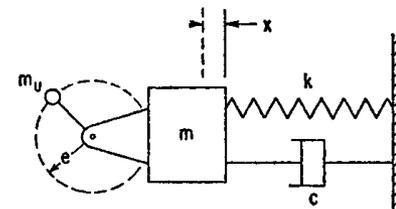


FIGURE 2.21 Single-degree-of-freedom system with viscous damper, excited in forced vibration by rotating eccentric weight.

Alivio de tensiones residuales mediante vibraciones subarmónicas



Esta tecnología realiza el tratamiento a baja frecuencia (al pie de la curva armónica). Método patentado por Bonal Technologies Inc bajo el nombre de **MetaLax**[®] se basa en dos principios:

- i. La frecuencia óptima de vibración para el alivio de tensiones se encuentra en la zona subarmónica, y
- ii. La presencia de esfuerzos residuales origina un desplazamiento de la frecuencia natural de un cuerpo.

Alivio de tensiones residuales mediante vibraciones subarmónicas



1. Los esfuerzos cíclicos inducidos (**Fig. a, b**) generan desplazamientos intermoleculares y un flujo de energía térmica variable en función del tiempo.
2. Como consecuencia de ello se genera un desfase entre deformación y esfuerzo.
3. Cuando la deformación elástica es variable en el tiempo, se habla de un efecto inelástico (*Esfuerzo vs. Deformación no lineal*)
4. El efecto inelástico da origen al amortiguamiento interno (una declinación en la amplitud de vibración, por tanto una disipación de energía, **Fig. c**).
5. El lazo de histéresis resultante está dado por la relación esfuerzo deformación bajo el efecto de una carga dinámica.
6. La energía disipada es producto del área por ciclo y el número de ciclos.

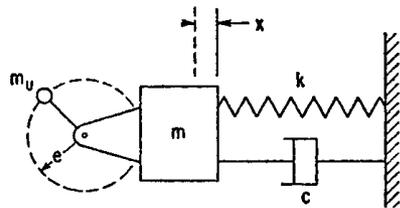
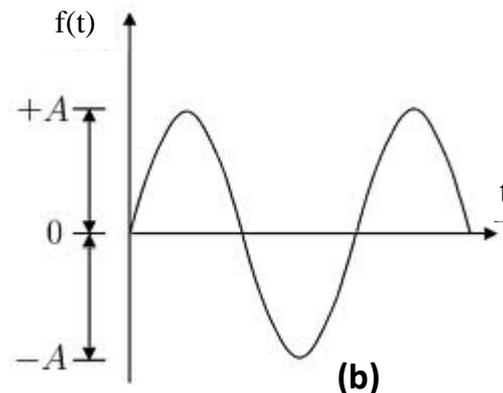
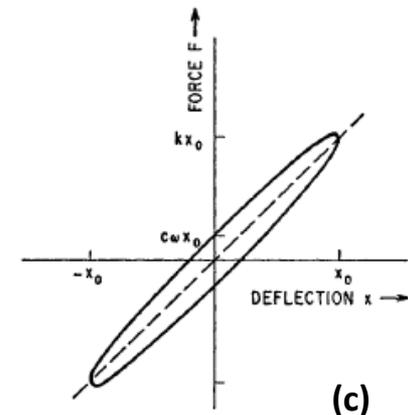


FIGURE 2.21 Single-degree-of-freedom system with viscous damper, excited in forced vibration by rotating eccentric weight.

(a)



(b)



(c)

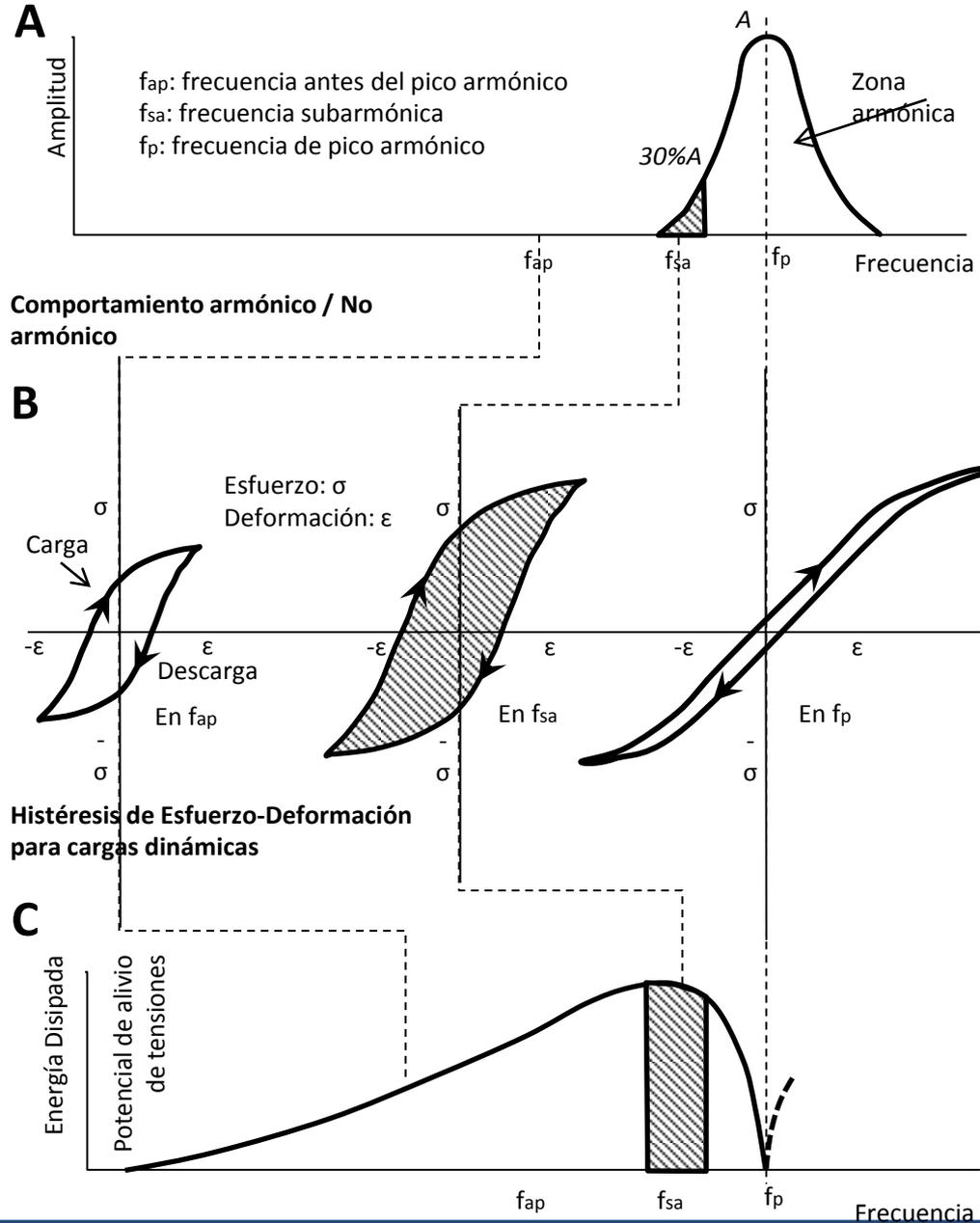
Primer Principio del Alivio de Tensiones mediante vibraciones subarmónicas



El fundamento teórico de esta tecnología se dio en 1987 mediante el “Estudio sobre la Teoría del Alivio de Tensiones Sub-resonantes” de Richard Skinner en el que explica cada parte de la curva de resonancia de un elemento y cómo ocurre la disipación de energía en función de la frecuencia aplicada, considerando como energía disipada a aquella cantidad de tensiones internas contenidas en una estructura que pueden ser liberadas.

Skinner muestra en el grafico siguiente que es la región subarmónica en donde existe un mayor potencial de disipación de energía mediante el vibrado.

Cuando a una pieza se le induce una frecuencia dentro de la zona subarmónica **(A)** 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 B)**. Si la frecuencia es muy baja o muy alta, la energía disipada es mínima **(C)**.

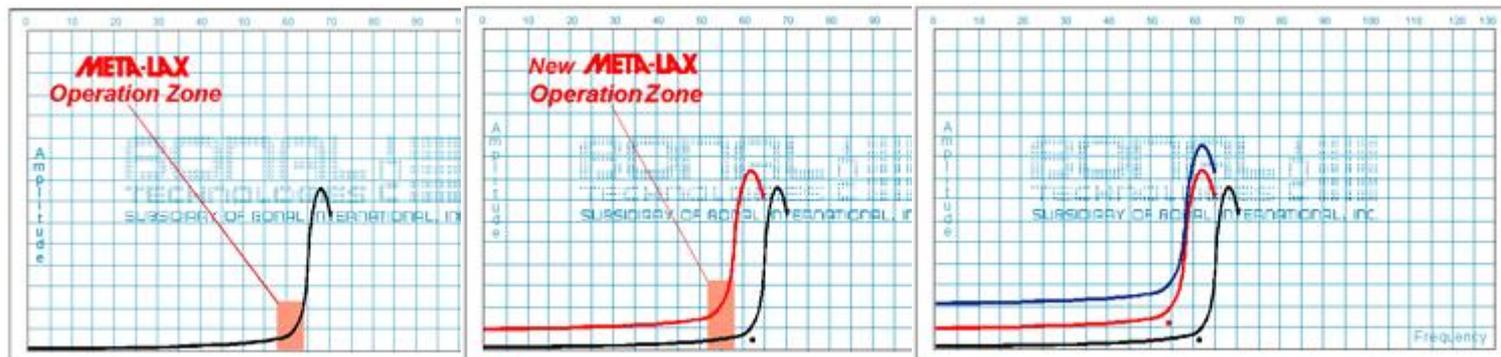


Segundo Principio del Alivio de Tensiones mediante vibraciones subarmónicas



- Toda pieza metálica internamente esforzada ve alterada su frecuencia natural y muestra una curva armónica “falsa”.
- Luego de que la pieza es “aliviada”, dicha curva se desplaza y se reacomoda en una nueva posición, natural y estable.

Este principio se visualiza en una gráfica *Frecuencia vs. Amplitud* en donde la curva armónica se desplaza y se estabiliza tan pronto como la pieza es liberada de tensiones. La magnitud del desplazamiento de la curva es un indicador de la cantidad de energía disipada por medio de las vibraciones.



Lectura 1: Respuesta inicial de la pieza (tensión residual)

Lectura 2: Desplazamiento de la curva post-vibrado

Lectura 3: Verificación de la estabilidad de la pieza (alivio de esfuerzos)

Procedimiento Experimental



Se prepararon seis probetas de 9mm x 150mm x 400mm de acero al carbono ASTM A-36 soldadas bajo método FCAW.

Las probetas fueron identificadas en tres juegos de dos probetas rotuladas y procesadas de la siguiente forma:

9AV1 y 9AV2: Probetas soldadas y sometidas a proceso de alivio de tensiones por vibraciones subarmónicas.

9TT1 y 9TT2: Probetas soldadas y sometidas a proceso de alivio de tensiones por tratamiento térmico

9ST1 y 9ST2: Probetas soldadas, sin ningún tratamiento posterior.

Procedimiento Experimental



Las probetas sometidas a ambos tratamientos de alivio de tensiones fueron procesadas de la siguiente manera:

1. Habilitado, soldadura, y rotulado
2. END líquidos penetrantes e inspección dimensional
3. Embalaje y envío aéreo al laboratorio DRX Proto Mfg, en Michigan, USA.
4. Electroerosionado a 0.5mm de profundidad para eliminar la capa de material superficial.
5. Selección e Identificación de puntos de medición de esfuerzos residuales.
6. Ensayo de medición de tensiones residuales “as weld” en diversos puntos alineados de forma transversal al cordón de soldadura.
7. Embalaje y envío aéreo a Lima, Perú.
8. Alivio de tensión, por vibraciones subarmónicas y por tratamiento térmico.
9. Ensayo de medición de tensiones residuales post-tratamiento en los mismos puntos medidos inicialmente (paso 5).
10. Análisis y comparación de mediciones antes y después de ambos tratamientos.

Dossier de Calidad del Proceso



TAMA INGENIEROS
S.A.C.

DOSSIER DE CALIDAD

ÍNDICE

	DESCRIPCION DE CONTENIDO	CODIFICACION
	INDICE	
1	PLAN DE PUNTOS DE INSPECCIÓN	T-AC-PPI
2	REGISTRO DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA (WPS)	T-AC-RG-09
3	REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTOS (PQR)	T-AC-RG-10
4	REGISTRO DE CALIFICACION DE SOLDADORES (WPQ)	T-AC-RG-11
5	REGISTRO DE RECEPCION DE MATERIALES	T-AC-RG-22
6	REGISTRO DE RECEPCION DE MATERIALES DE APORTE Y CONSUMIBLES	T-AC-RG-23
7	REGISTRO DEL CONTROL DIMENSIONAL	T-AC-RG-08
8	REGISTRO DE INSPECCION DE SOLDADURA.	T-AC-RG-12
9	REGISTRO DE TINTES PENETRANTES	T-AC-RG-30
10	ACTA DE LIBERACIÓN FINAL	T-AC-RG-21

Nombre del representante del proveedor: TAMA INGENIEROS S.A.C.		Fecha de emisión: 25/11/2013		Revisión No.0	
Datos de contacto: Calle 3 MZA, Lt.6b Urb. Barbadillo, ATE, Perú		Página 2 de 3			
Número de Documento: T-AC-PPI-028-2018					
PLAN DE INSPECCIÓN Y ENSAYO (PPI)					
Nombre del Proyecto: EVALUACION DEL PROCESO DE ALIVIO DE TENSIONES META-LAX		Orden de Trabajo: 042-13			
Proyecto No.: ---		Número de contrato: ---			
Cliente Final: TAMA INGENIEROS S.A.C.		TAG No: 9ST1@2-9TT1@2-9AV1@2			

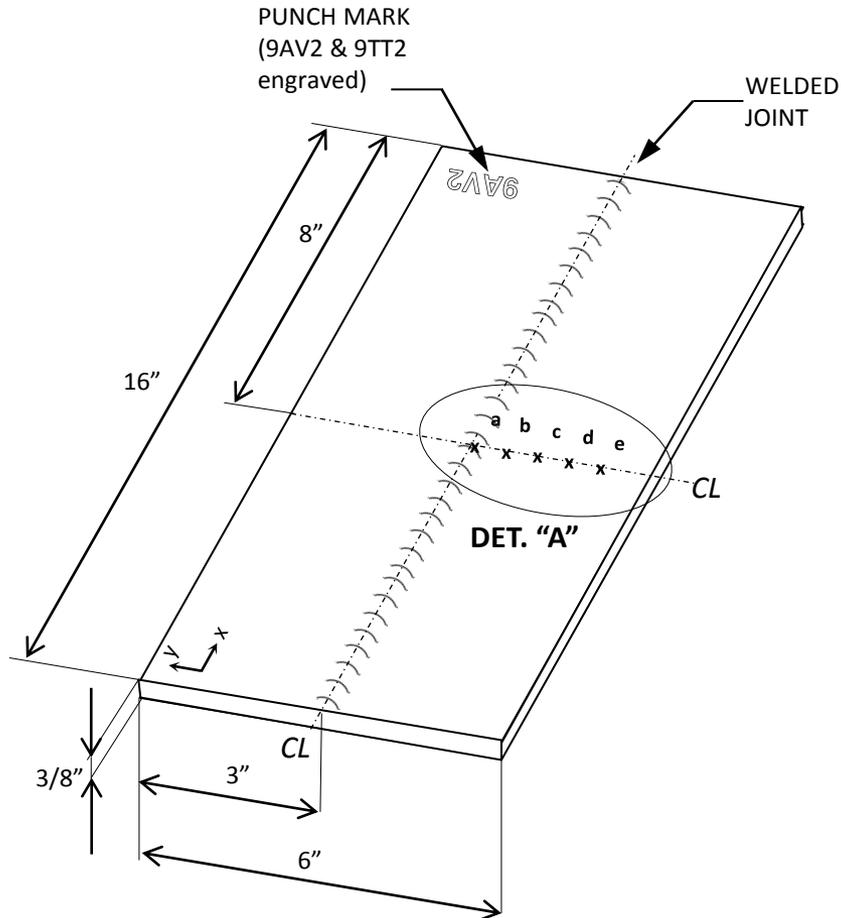
ACTIVIDAD No.	ETAPAS DEL TRABAJO	DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA	CARACTERÍSTICA A INSPECCIONAR	MÉTODO DE INSPECCIÓN	FRECUENCIA	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	REGISTRO APLICABLE	INSPECCIÓN	
								TAMA	SUPERVISIÓN EXTERNA
2.2	Recepción de soldadura	<ul style="list-style-type: none"> Listado de materiales. Órdenes de compra. Certificados de Calidad. 	<ul style="list-style-type: none"> Completamiento de especificaciones técnicas. Estado físico del suministro. 	<ul style="list-style-type: none"> Visual. Revisión documental. 	<ul style="list-style-type: none"> Cada vez que ingresa material. 	<ul style="list-style-type: none"> Según normas AWS AC-20 y otras aplicables. Según hoja técnica del fabricante. 	T-AC-RG-25	DR/WP	N.A.
3.0 Fabricación en taller									
3.1	Acabado	<ul style="list-style-type: none"> Planes aprobados para fabricación. 	<ul style="list-style-type: none"> Principales medidas funcionales. Materiales Correctos. Limpieza de Juntas de Soldadura. 	<ul style="list-style-type: none"> Visual. Medición directa. 	<ul style="list-style-type: none"> 100% 	<ul style="list-style-type: none"> De acuerdo a planes aprobados para fabricación. Tolerancias dimensionales según DIN 8570 precisión Media. 	T-AC-RG-08	WP	N.A.
3.2	Soldado	<ul style="list-style-type: none"> Planes aprobados para fabricación. WPS aplicable Calificación de soldador 	<ul style="list-style-type: none"> Metal base y de aporte. Parámetros de soldado. 	<ul style="list-style-type: none"> Visual Revisión documental Medición directa con instrumentos aplicables. 	<ul style="list-style-type: none"> Verificación aleatoria de parámetros. 	<ul style="list-style-type: none"> Según WPS aplicable 	T-AC-RG-12	DR/WP	N.A.

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA								Detalles de la Junta
Pase o capa(s)	Proceso	Metal de aporte Clase	Diam. (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (cm/min)	
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	

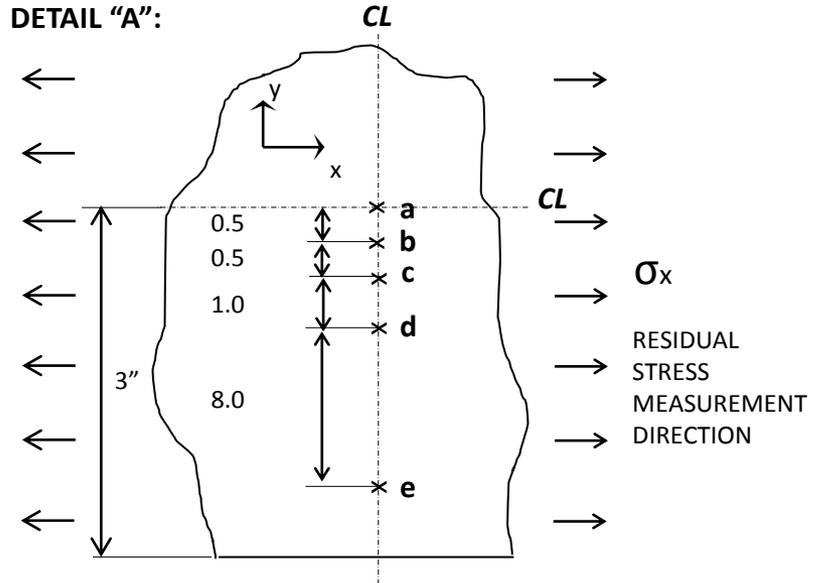
(*) Se debe depositar 3 cordones de soldadura por un lado, luego soldar el lado posterior, así sucesivamente hasta terminar la costura.

Identificación y rotulado de probetas





DETAIL "A":



NOTES:

- MATERIAL OF SPECIMENS: Carbon steel ASTM A36.
- DIMENSIONS: 3/8" H x 6" W x 16" L
- N° of samples: 02 (Marks: 9AV2 & 9TT2)
- MEASUREMENT POINTS PER SAMPLE: 05
- LOCATIONS:
Point **a**: Center of the plate, on the welded joint
Points **b, c, d, e**: $\approx 5/8$ " from point **a**, each.
- DIRECTION OF STRESS MEASUREMENT: Stresses shall be measured in the direction of longitudinal axis (parallel to the weld beam, σ_x)
- MEASUREMENT DEPTH: 0.5mm

Medición de esfuerzos residuales en laboratorio Proto Mfg. Michigan, USA



PROTO
MANUFACTURING

A WORLD OF SOLUTIONS

HOME

PRODUCTS

MEASUREMENT SERVICES

KNOWLEDGE CENTER

ABOUT US

CONTACT US



LABORATORY SERVICES

For over 25 years our laboratories have been providing x-ray diffraction measurement services to industry. Our full service laboratories have all the tools necessary for carrying out your measurement requirements.



LABORATORY SERVICES

FIELD SERVICES

Medición de esfuerzos residuales en laboratorio Proto Mfg. Michigan, USA



Form 132 - Standard Summary Report - Residual Stress Proto Manufacturing Inc.

TAMA - 14004T

Setup Parameters:

Target: Cr (Ka avg 2.291 Angstroms)	Oscillation(s): Beta 4.00°	Date: 07/07/2014
Target Power: 30 kV, 25 mA	Total Collection Time: 0.5 seconds x 20 exposures	<i>ASTM E 915:</i>
Gain Material: β Titanium Shim	Total Collection Time: 4 minutes 06 seconds	Operator: Tom Summons
Gain Power: 17 kV, 25 mA	Peak Fit: Gaussian 85%	Material: Fe Powder
Filters: none	Two Peak Model: No	Stress (ksi)
Material: Steel (Ferritic)	LPA Correction On: Yes	Error (ksi)
X-Ray Elastic Constant: 24,500 ksi	Gain Correction: P/G(s)	1 -0.0 ± 0.3
Crystallographic Plane: {211}	Background Subtraction: Linear	2 -0.4 ± 0.3
Bragg Angle (2 θ): 156.41°	Peak Shift Method: Absolute Peak	3 -0.0 ± 0.4
Aperture: 1 mm	Psi Zero Assignment: Curve Fit Linear	4 -1.4 ± 0.4
Powder Correction: No	Instrument: LXRD 11999	5 -0.8 ± 0.4
Autoremove Bad Points: No	Software Version: 2.0 Build 87	Average -0.5 ± 0.3
Psi Tilts: 22	Gonimeter Configuration: Psi	Standard Deviation ± 0.6
Tilts: (0, ± 30.00, 24.80, 19.29, 11.80, 5.55)		

Experimental Results: Subsurface Measurements on Two (2) Steel Plates

Measurement Location: 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 ± 2	+19 ± 2	0.559	+26 ± 1	+4 ± 1	9 ± 3	22 ± 1
0.5	0.511	+16 ± 1		0.485	+23 ± 1			
1.0	0.498	+24 ± 1	+22 ± 2	0.505	+27 ± 1	+1 ± 1	1 ± 3	25 ± 2
2.0	0.523	+27 ± 2	+26 ± 2	0.561	+39 ± 1	+6 ± 1	1 ± 3	33 ± 2
12.0	0.541	+11 ± 2	+6 ± 3	0.503	+26 ± 2	+1 ± 1	5 ± 4	25 ± 2
22.0	0.541	+8 ± 1	+3 ± 2	0.489	-2 ± 1	-3 ± 2	5 ± 2	1 ± 2
32.0	0.523	-15 ± 2	-11 ± 2	0.503	-8 ± 2	-1 ± 1	4 ± 3	7 ± 2
42.0	0.498	-17 ± 1		0.500	-13 ± 1			
Average Change in Stress (ksi)							4 ± 3	19 ± 2

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

Residual Stress vs. Distance from Weld Toe

Picture: Measurement Location

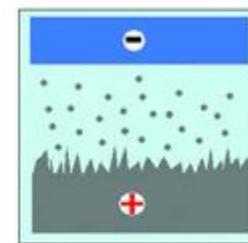
Gabe Grodzicki
James Pineault

Date: 07/07/2014
Date: 07/07/2014

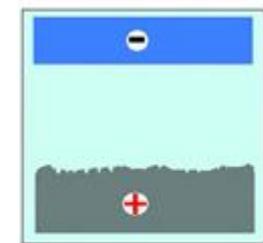
This laboratory is accredited for testing in accordance with the recognized International Standard ISO/IEC 17025:2005 by P.I.L.A. accreditation #71619. This accreditation demonstrates technical competence for a defined scope and the operation of a laboratory quality management system refer joint ISO-ILAC-LAP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



Electropulido de probetas en laboratorio Proto Mfg. Michigan, USA



before



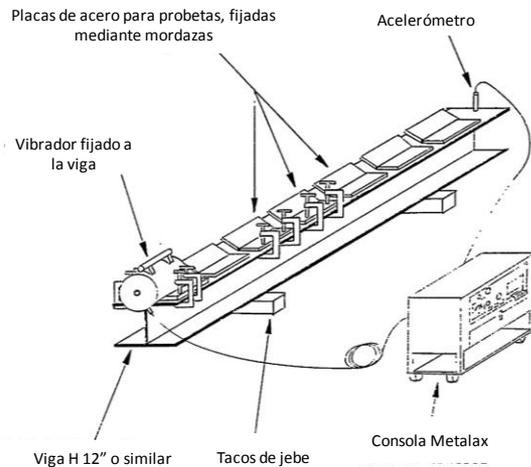
after

Accreditación del laboratorio

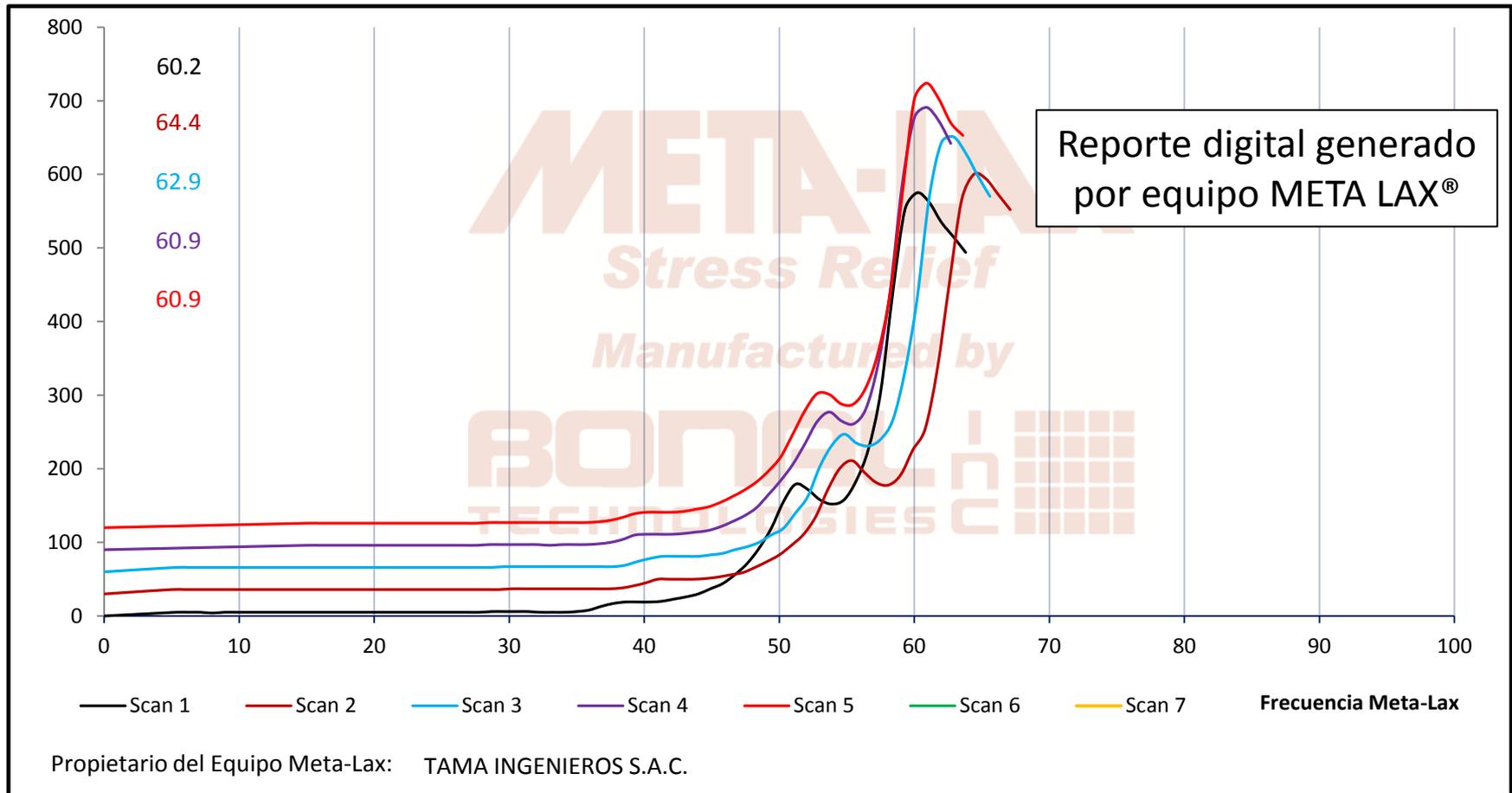


“La acreditación demuestra competencia técnica para los alcances definidos por la norma ISO/IEC 17025:2005 y para la operación de un sistema de gestión de calidad del laboratorio en: END, medición de tensiones residuales mediante métodos mecánicos y químicos y medición de austenita retenida mediante difracción de rayos X (DRX)”

Alivio de tensiones residuales en Tama Ingenieros S.A.C.



Alivio de tensiones residuales en Tama Ingenieros S.A.C.



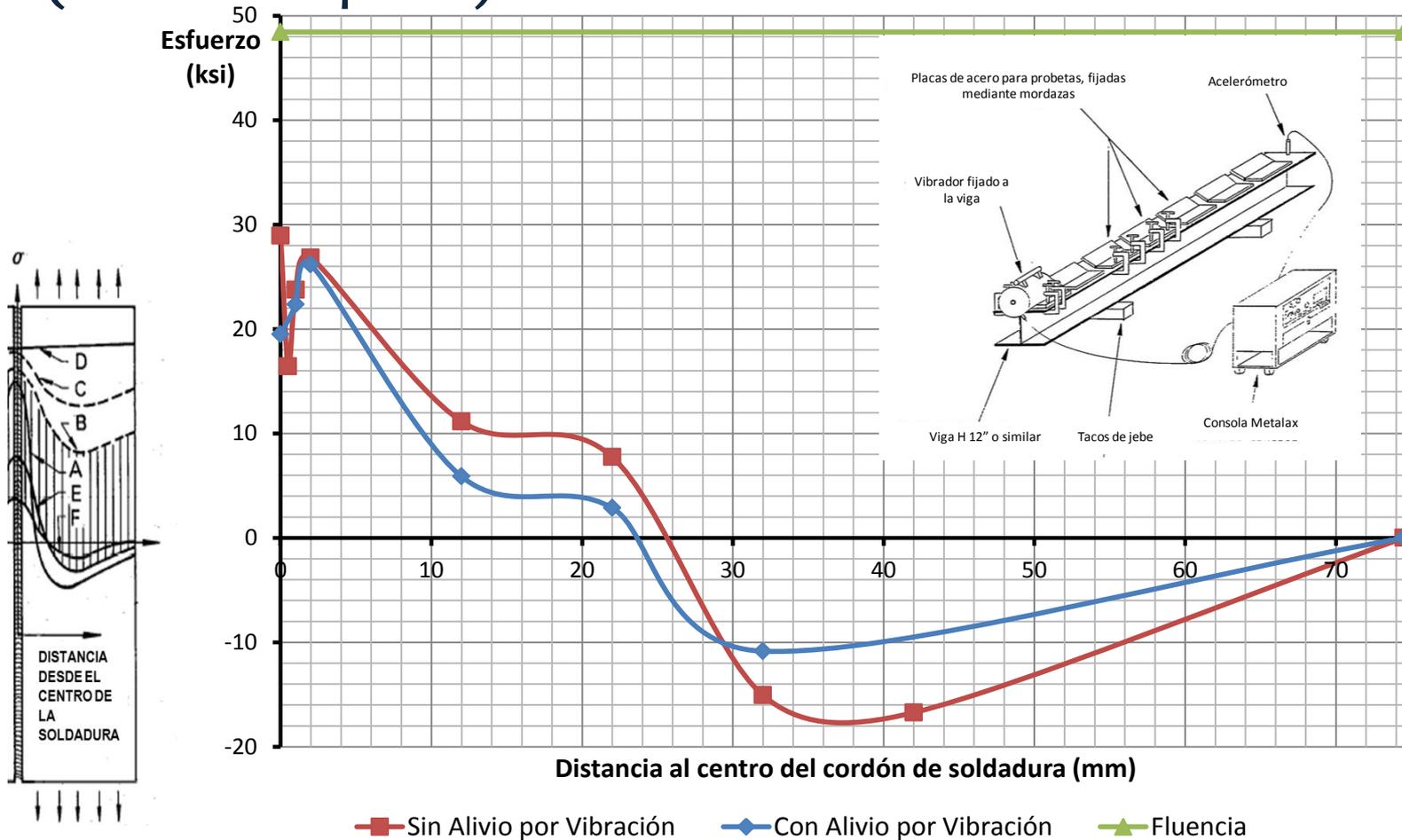
Alivio de tensiones residuales en Tama Ingenieros S.A.C.



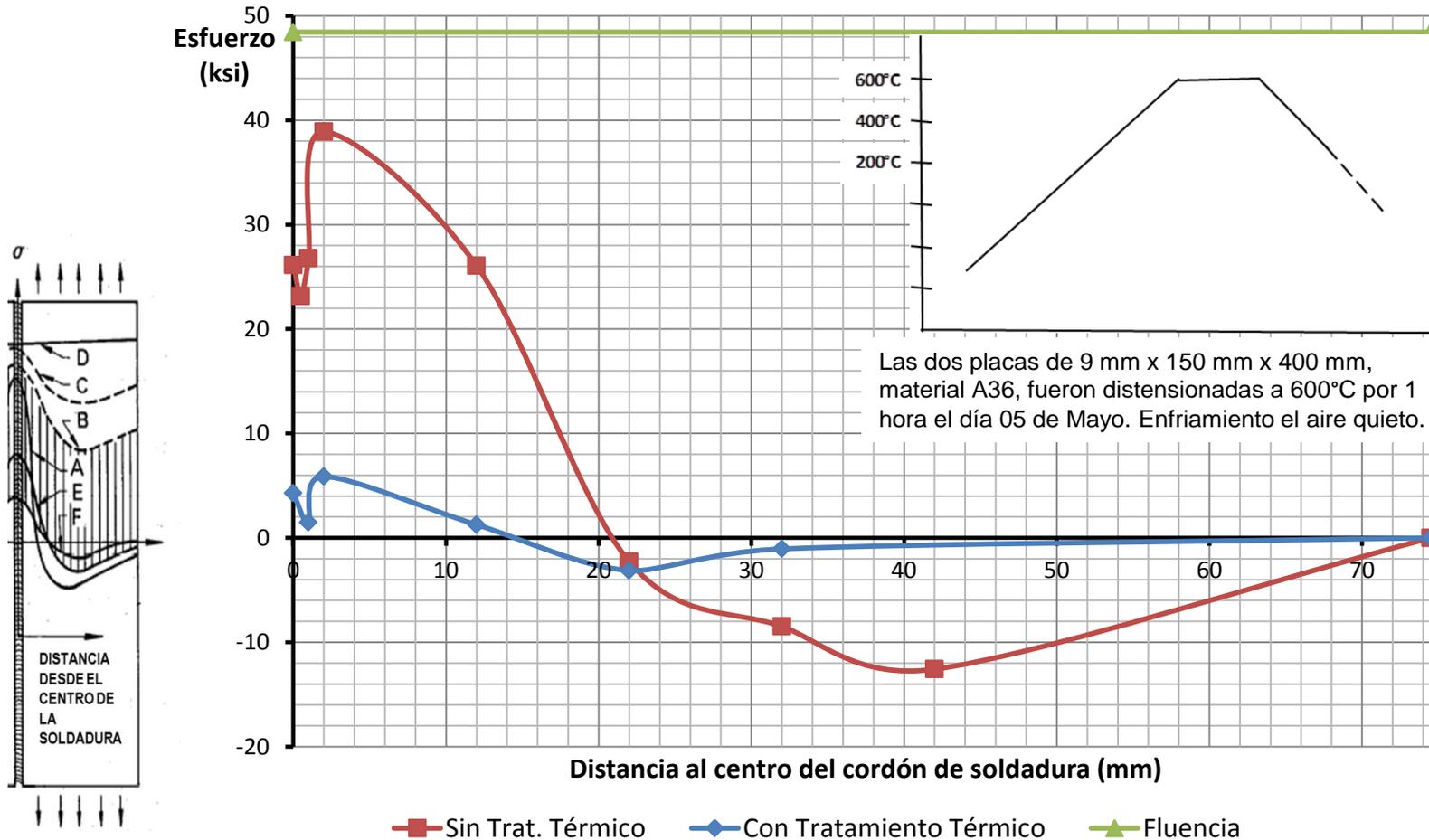
Reporte digital generado
por equipo META LAX®

Fecha	16/05/2014		Cliente	TAMA INGENIEROS S.A.C.		Dirección	CALLE 3 MZ. A LOTE 6B. ATE. LIMA 03. PERÚ				
Orden de Trabajo	OTI 042-13		Operador	R. VALLADARES		Inductor de Fuerza	V8	Leva	60 %		
Parte	WF10"x54#x2198-9AV1/9AV2		Nº Parte	TEST PROBETAS TAMA ING		Material/Clase	ASTMA36				
Posición	1	Medidas	250 x 250 x 2198 mm		Peso	190 Kg	Directorio	RECIPES	% Pico	34%	
						Notas:					
Frecuencia		Tiempo		Frecuencia		Tiempo		Frecuencia		Tiempo	
Alivio M-L		(MIN.)		Alivio M-L		(MIN.)		Alivio M-L		(MIN.)	
Scan 1	60.1	20.0	Scan 3	56.6	10.0	Scan 5	0.0	10.0	Los picos de frecuencia de las dos últimas mediciones coinciden en 60.9, lo cual evidencia la finalización del proceso de alivio de tensiones. El proceso de Alivio de Tensiones Meta-Lax concluye cuando la frecuencia de pico se repite ± 0.8		
Scan 2	58.8	10.0	Scan 4	56.1	10.0	Scan 6					

Medición de tensiones residuales: Vibraciones subarmónicas (antes-después)



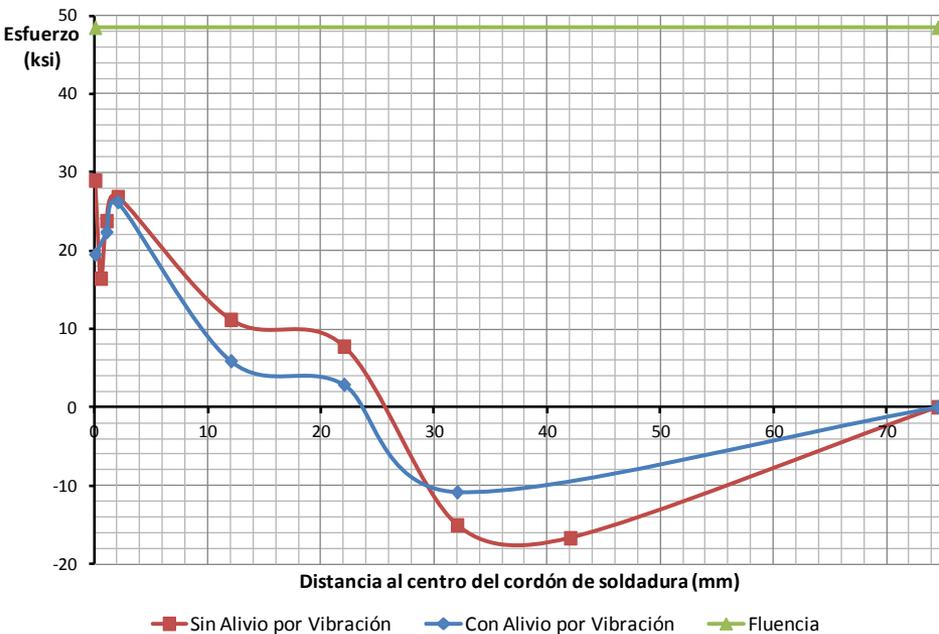
Medición de tensiones residuales: Tratamiento térmico (antes-después)



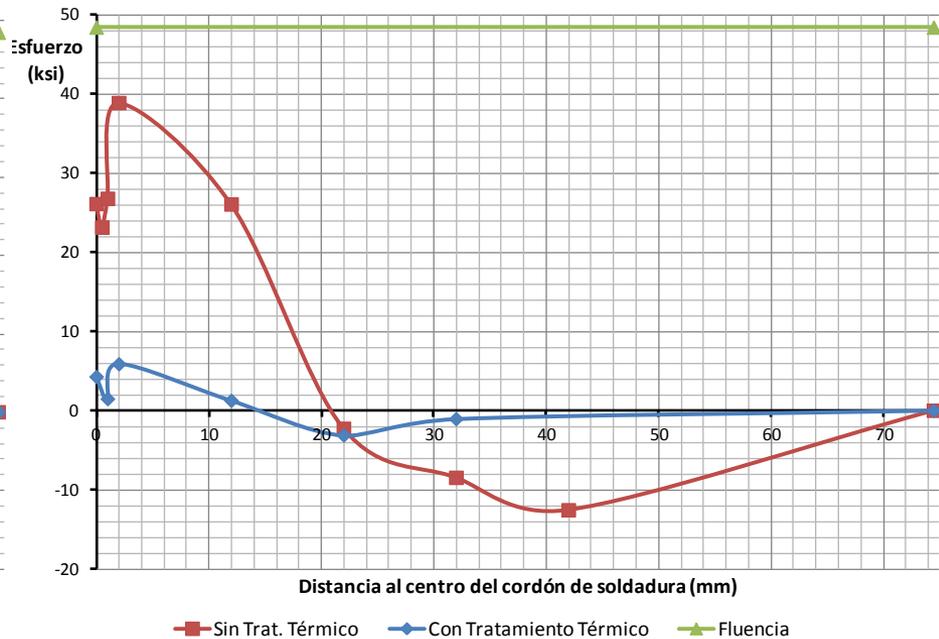
Alivio de esfuerzos tensiones por vibraciones subarmónicas vs. Tratamiento Térmico



Efecto del Tratamiento por Alivio de Tensiones



Efecto del Tratamiento Térmico

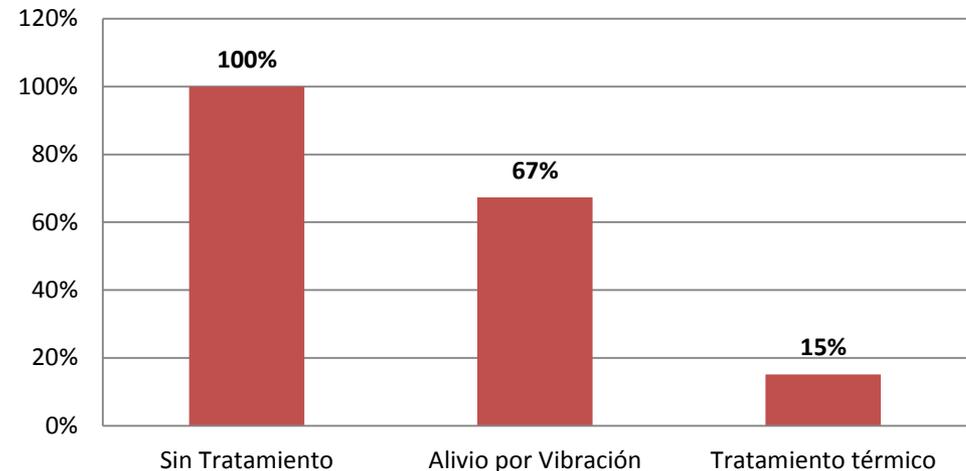




Resultados

Los resultados reportan una reducción promedio de 33% en la magnitud del esfuerzo residual en el pico de máxima tensión mediante el proceso MetaLax[®] versus el 85% de reducción que se logra en el caso del tratamiento térmico (esfuerzos medidos en sentido paralelo al cordón de soldadura).

Esfuerzos residuales en picos de máxima tensión post-tratamiento



Ventajas técnicas del alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas respecto a los Tratamientos Térmicos

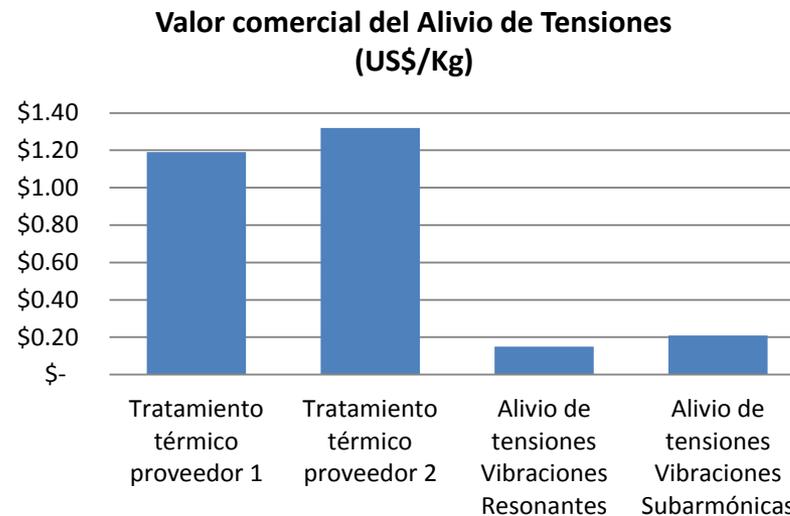


- La energía eléctrica necesaria para reducir las tensiones residuales mediante el método de vibraciones subarmónicas fue significativamente menor en comparación con la utilizada para el tratamiento térmico en horno GLP.
- El tratamiento térmico convencional requiere de un tiempo de proceso de varias horas mientras que el proceso de vibrado toma de 45 a 60 minutos en promedio.
- La resistencia máxima de una unión soldada después del tratamiento de alivio de tensiones por vibración es mayor que aquella que resulta después de un tratamiento térmico debido a que no se altera la estructura cristalina del metal.
- No genera distorsiones dimensionales después del tratamiento.
- Las estructuras metálicas a las que se aplique este método de alivio de tensiones lograrán un ciclo de vida más prolongado, sobre todo aquellas que trabajan sometidas bajo esfuerzos cíclicos de fatiga, evitando diseños mecánicos sobredimensionados a causa de factores de seguridad que buscan reducir el riesgo de falla por fatiga

Ventajas técnicas del alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas respecto a los Tratamientos Térmicos



- El costo unitario del tratamiento de alivio de tensiones mediante vibraciones subarmónicas resultó ser casi la sexta parte del costo unitario del tratamiento térmico
- Menor contaminación ambiental y emisión de gases de efecto invernadero.



(*) Precio de TT 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) x1422 (W) X 1310 (H) MM, 1479 Kg, Material A-36

(***) Costo referencial del Alivio de Tensiones mediante vibraciones subarmónicas



T A M A
INGENIEROS S. A. C.

Alivio de tensiones residuales mediante vibraciones subarmónicas en uniones soldadas de acero al carbono

Fundamentos y Resultados Experimentales

Lima, Setiembre del 2014

Rolando Valladares Valdivieso

Investigación y Desarrollo

TAMA INGENIEROS S.A.C.

rvalladares@tama.pe

ecardenas@tama.pe

(C) 992 706 507 | (T) 715-1280