

Reducción de esfuerzos residuales en uniones soldadas usando tratamiento con explosivo

García Jacomino J. L.¹, Burgos Sola J., Cruz Crespo A., Álvarez Luna M., García Arteaga J.

Fecha de recepción: 24 de noviembre de 2006 – Fecha de aceptación: 11 de abril de 2008

RESUMEN

En el trabajo se evalúa el efecto de la detonación de un explosivo como método para reducir los esfuerzos residuales en la zona afectada por el calor en las uniones soldadas. Se realizó un análisis comparativo de dos alternativas de colocación de la carga explosiva: una de forma lineal y la otra de forma sinusoidal. Los resultados experimentales obtenidos corroboraron la efectividad del método y demostraron que en ambas formas o alternativas se logró una disminución de los esfuerzos residuales entre el 50 y el 60%, comprobándose que el tratamiento ofrece una alternativa viable para extender la vida útil de las uniones soldadas.

Palabras clave: Esfuerzos residuales en uniones soldadas, tratamiento por explosivos, alivio de esfuerzos residuales.

Reduction of residual stress in welded unions by using explosive treatment

ABSTRACT

In this paper, the effect of explosive charges, as a method to reduce the residual stresses in the heated zone of welded unions, was studied. A comparative analysis of two geometries of the explosive charge applied on welded unions was made using the linear and sinusoidal geometries. The results obtained before and after the corresponding explosive treatment, demonstrated their effectiveness by a reduction of the residual stresses. Residual stress reductions ranged between 50 and 60%, confirming that explosive treatment offers a viable solution to extend the life of welded unions.

Keywords: welding unions, explosive treatment, residual stresses reduction.

¹ Profesor Investigador, Grupo de Diagnóstico y Pronóstico de Fallas, Centro de Investigación de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km. 5½, Santa Clara, Villa Clara, CP. 54830, Cuba. E-mail: jacomino@uclv.edu.cu

INTRODUCCIÓN

Una característica distintiva de la soldadura como proceso de unión está dada por los fenómenos de transferencia de calor de una fuente móvil, donde las dimensiones de la pieza llevan a variaciones desiguales de volumen por diferencia de gradientes de temperatura y a veces de coeficientes de dilatación lineal que bajo condiciones dadas de embridamiento, generan mayor o menor número de esfuerzos residuales (Masubuchi, 1980 y Mochizuki et al, 2005).

Los esfuerzos térmicos de compresión resultante corresponderán a aquellos que producen una reducción de volumen equivalente a la acción de impedimento de la expansión. Cuando la máxima temperatura alcanzada no exceda de cierto valor, dicho esfuerzo se ubicará en el campo elástico y su valor será igual al múltiplo de la deformación específica ($\Delta L/L_0$) por el modulo de elasticidad del material (Glizmanenko, 1968 y Mochizuki et al, 2005).

En el caso de una unión soldada, en la Zona de Influencia Térmica (ZIT), donde se supera el valor de la temperatura de la zona elástica, los esfuerzos de compresión tienden a superar a los de fluencia a esa temperatura, pero en ningún momento lo logra. El proceso inverso ocurre durante el enfriamiento en condiciones de movimiento restringido. Las zonas que se vieron afectadas durante la deformación plástica en caliente resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces, esfuerzos térmicos de tensión. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado esfuerzos térmicos permanentes cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material (Masubuchi, 1980 y Mochizuki et al, 2005).

Los esfuerzos residuales pueden llegar a tener valores elevados y no permisibles (Guliaev, 1977; Glizmanenko, 1968 y Masubuchi, 1980), por lo que es necesario reducir dichos esfuerzos, existiendo diferentes métodos los cuales son agrupados en dos grandes campos: por tratamientos térmicos y por tratamientos mecánicos; ambos (bien conocidos) son utilizados para reducir los esfuerzos residuales, incluyendo precalentamiento, postcalentamiento, impactos, vibraciones, etc. (Guliaev, 1977 y Mead, 2003). Pero, para el caso de construcciones o estructuras metálicas de gran porte para tratamientos “in situ” están limitados.

La energía liberada en la detonación de una sustancia explosiva, como fuente de impacto localizado en la zona afectada por el calor, resulta un método alternativo y perspectiva de tratamiento mecánico, para aplicarse en el alivio de los esfuerzos residuales de estructuras metálicas voluminosas y de difícil acceso (Petushkof, et al., 1976; Schmidt et al., 1992; Trufiakov, et al., 1972;

Didyk et al., 1994 y Petushkof, 2003). Este método de alivio de esfuerzos no ha sido ampliamente difundido por requerir de un conocimiento específico en el área de uso de explosivos, (campo de conocimiento que en la mayoría de los casos se aplica al área militar y minera), por considerarse de alto riesgo y que exige medidas especiales de seguridad. No obstante, la simplicidad relativa del método, cuando se domina el uso adecuado de explosivo, hacen de ésta una variante atractiva. En este trabajo se presenta como objetivo básico el estudio de la eficacia del alivio de esfuerzos residuales con explosivos en uniones de acero al carbono.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales empleados

El material seleccionado para las probetas de 400x80x10 mm fue el acero de construcción ASTM A36, cuyas propiedades mecánicas son: límite de fluencia de 250 MPa (36300 psi), límite de rotura de 400-550 MPa (58000 - 79800 psi) y 23% de elongación en 50 mm de longitud calibrada (ASTM, 2004).

El electrodo empleado en el trabajo de soldadura para la realización de las uniones fue el E6013 VD, según calificación AWS de 3 mm de diámetro (ANSI/AWS A5.1-91, 1991).

Soldadura de las probetas

La sujeción de la probeta se realizó mediante el dispositivo mostrado en la figura 1, el cual impidió la libre dilatación y contracción de la misma durante la aplicación del calor en el proceso de soldadura. El apriete de los tornillos fue realizado con una llave de apriete controlado a 130 N-m, comenzando por un extremo del dispositivo y terminando por el otro, adecuando un apriete homogéneo para cada probeta en toda la sección, además de garantizar que las condiciones de rigidez fuesen uniformes en todas las repeticiones del experimento.

Se logró la holgura en la junta a soldar de las probetas mediante una lámina de acero de 1,5 mm de espesor (separador), mantenida en el lugar durante el apriete y retirándola al momento de soldar. El proceso de soldadura utilizado fue el de arco eléctrico manual con electrodo revestido (SMAW), utilizando una corriente de soldadura de 130 A, en posición plana.

Durante la realización del proceso se registraron los valores de la corriente de soldadura, el voltaje del arco y el tiempo de realización del cordón. Los parámetros de corriente y voltaje de soldadura fueron medidos en tres puntos de la junta soldada y se utilizó la media de los mismos para los cálculos. Con el tiempo medido y la longitud del cordón se determinó la velocidad de

soldadura. Una vez terminada la soldadura, la probeta se dejó enfriar hasta la temperatura ambiente y luego fue

retirada del aditamento y limpiada sin la aplicación de golpes fuertes.

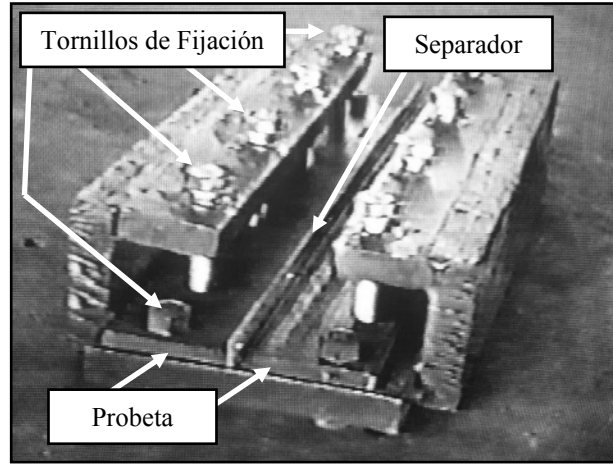


Figura 1: Dispositivo de sujeción

Cálculo de la Zona de Influencia Térmica (ZIT) o Zona Activa (B_{pl})

Utilizando el método propuesto por Trochún (Frolov, 1988), la Zona Activa (B_{pl}), se calculó conforme a la Ecuación 1.

$$B_{pl} = b_1 + b_2 \quad (1)$$

Siendo:

$b_1 = 0,484 * q_0 / (C_p * T^*)$ - ancho de la zona plástica, mm;
 $q_0 = Q_{ef} / (V_s * \delta)$ - energía lineal específica de soldadura, J/cm²;

$Q_{ef} = V_a * I_s * \eta$ - potencia efectiva, J/cm;

$b_2 = K_2 * (h - b_1)$ - ancho de la zona elasto-plástica, mm;

C_p = capacidad calorífica volumétrica, J/cm³ °C;

T^* = temperatura de transición, °C;

V_s = velocidad de soldadura, cm/h;

δ = espesor de calculo (dos veces el espesor de la chapa), cm;

V_a = voltaje de arco, V;

I_s = corriente de soldadura, A;

η = eficiencia del arco;

K_2 = coeficiente determinado experimentalmente;

H = semilongitud de la chapa, cm.

En la Tabla 1 se muestran los valores de los parámetros de soldadura medidos durante la realización del experimento, así como los resultados de los cálculos de la Energía lineal específica y de la Zona Activa (B_{pl}) usando el método explicado.

Tabla 1. Parámetros de Soldadura y Resultados de Cálculo de la Zona Activa (B_{pl}).

Probetas	Parámetros de Soldadura			Energía lineal específica	Ancho zona plástica	Ancho zona elasto-plástica	B _{pl}	2B _{pl}
	I _s (A)	V (V)	V _s (cm/s)	Q ₀ (J/cm ²)	b ₁ (cm)	b ₂ (cm)	(cm)	(cm)
A, B, C,	128	25	0.18	5633	0.87	1.57	2.50	5.00
D, E y F	131	28	0.25	7511	1.16	1.63	2.73	5.48

Reducción de esfuerzos residuales por explosivo.

Una vez realizado el cálculo de la zona activa se marcó la misma directamente en la chapa, utilizando un lápiz cristalográfico, de modo que permitiera identificar la zona donde se va a colocar el explosivo, de forma que actúe directamente sobre la misma.

Existen diferentes formas de colocación del explosivo (Petushkov, 2001; Titov et al., 2002; Petushkof, et al.,

1976); en este trabajo fueron utilizadas dos variantes de disposición para el cordón detonante:

Variante I: Disposición sinusoidal del cordón detonante sobre el cordón de soldadura (figura 2).

Variante II: Disposición de dos hilos paralelos del cordón detonante al cordón de soldadura (figura 3).

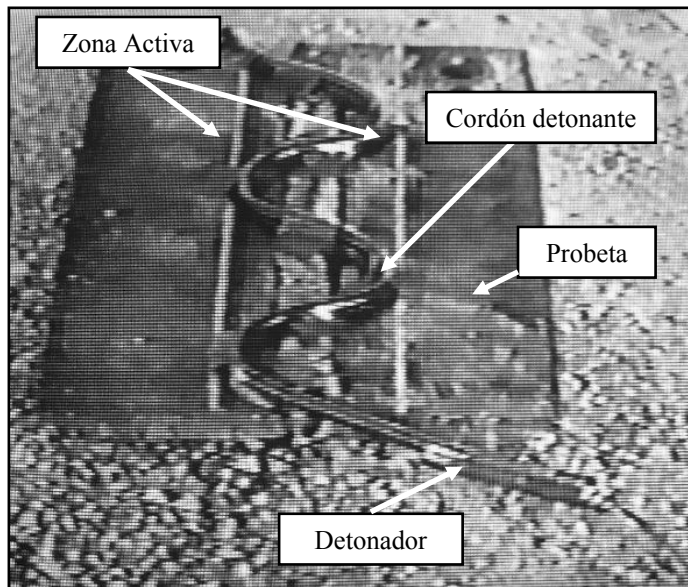


Figura 2: Disposición Sinusoidal del cordón detonante

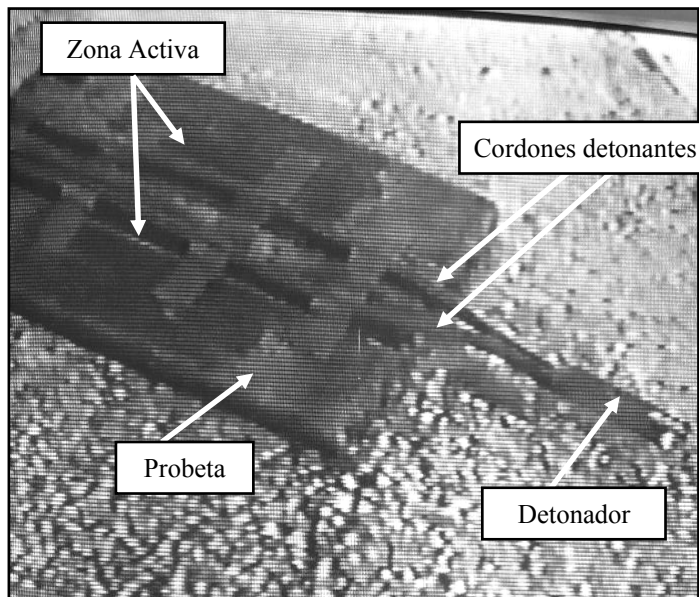


Figura 3: Disposición de dos hilos paralelos del cordón detonante

Como puede observarse en las figuras 2 y 3 se empleó cinta adhesiva para mantener al cordón detonante en la posición correcta sobre la base de recomendaciones de la literatura para ambos sistemas de disposición. El cordón detonante utilizado tiene 10,6 gramos de explosivo por metro, con núcleo de Hexógeno (Kohler et al, 1990).

Durante la realización de toda la etapa experimental se cumplieron las medidas de seguridad establecidas para el trabajo con explosivos (NOM-005-STPS, 1998). Las probetas se llevaron al polígono de pruebas, se situaron sobre apoyo plano en el lugar, con las condiciones requeridas para efectuar la detonación. Una vez realizada la detonación del cordón detonante se puede observar que la superficie de la probeta no se daña por el

efecto de la onda de choque, solo en el lugar de contacto entre el explosivo y la chapa existe una ligera huella, casi imperceptible a la vista.

Medición de los esfuerzos residuales

La medición de los esfuerzos residuales se realizó mediante extensómetros, utilizando el puente de Wheatstone como circuito fundamental para medir de forma directa el desequilibrio eléctrico que se produce tras la deformación de las galgas (Poblet, et al, 1983; Kandil, et al, 2001 y Withers, et al, 2001).

Se utilizaron extensómetros de fabricación japonesa marca Kyowa, cuyas características principales se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2 Características de los extensómetros utilizados.

Modelo	Factor de Galga	Medidas de la Base	Longitud de la Galga	Resistencia de la Galga
KFG-20-120-C1-11	2.1	28 x 8 mm	20 mm	120 Ω

Los extensómetros fueron adheridos en el centro de las probetas paralelos al cordón de soldadura, separados a

una distancia de 10 mm uno de otros (figura 4).

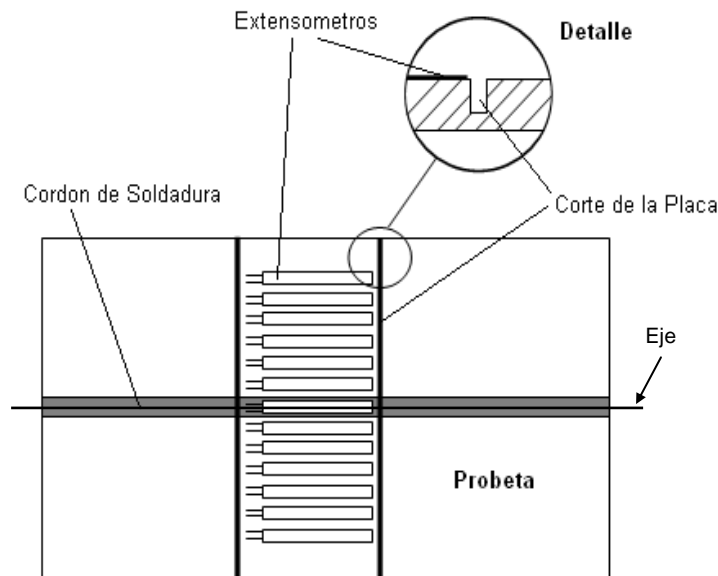


Figura 4: Colocación de los Extensómetros

La preparación de la superficie de la probeta y la fijación de los extensómetros para efectuar las mediciones se hizo siguiendo los procedimientos establecidos para este fin. Luego de tener los extensómetros adheridos a la superficie de la probeta se pegaron contactos eléctricos para evitar el deterioro de los sensores y se recubrieron con parafina. Se utilizó un conmutador a fin de medir la variación de voltaje de los

seis extensómetros, con el objetivo de obtener los datos para el cálculo de los esfuerzos residuales longitudinales (σ_x).

Debido a que el método de medición empleado es destructivo y que el impacto de la onda de choque del explosivo destruye a las galgas, fue necesario seccionar cada probeta original en dos partes, la primera para la

medición de los esfuerzos “antes” y la segunda para la medición de los esfuerzos “después”. Esto permite obtener los esfuerzos en ambos momentos y calcular el por ciento de reducción.

El corte de las probetas, según muestra la figura 5, se realizó con un disco de 1,5 mm de espesor, utilizando

una fresadora horizontal 6P80. Los cortes se realizaron perpendiculares al cordón de soldadura y con velocidades mínimas para evitar la inducción de nuevos esfuerzos residuales o que alteraran los valores de los ya existentes. Esta prueba se efectuó con tres probetas (1 experimento y 2 réplicas) para cada tipo de disposición del cordón detonante.

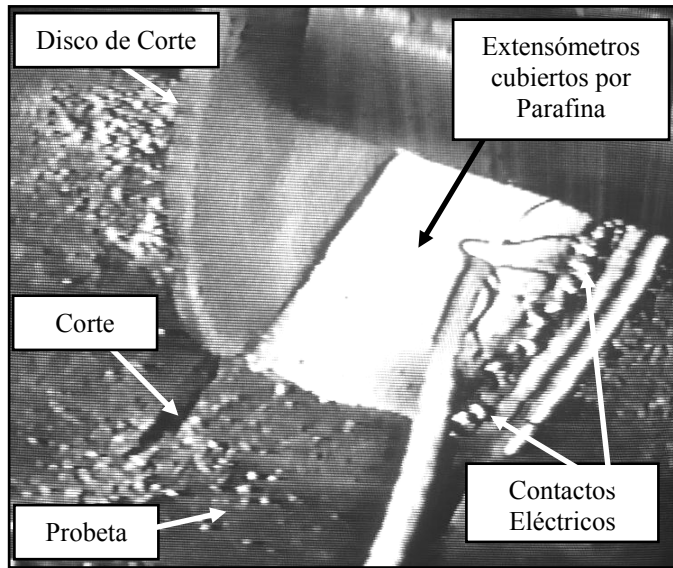


Figura 5. Corte de la probeta

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados del cálculo de los esfuerzos residuales longitudinales (σ_x), de las probetas, antes de aplicarle el tratamiento con explosivos y después de hacerlo, en ambas **variantes utilizadas de colocación del cordón detonante**, se pueden observar en la Tabla 3.

Estos valores de σ_x antes de aplicarle el tratamiento con explosivo, no muestran variaciones significativas de sus valores de tensión residual medidos, oscilando de un valor mínimo de 383.96 MPa en la probeta A hasta un máximo de 418.29 MPa en la probeta D sobre el cordón de soldadura, lo cual comprueba la homogeneidad de las condiciones en que se soldaron las probetas, y asegura que el dispositivo diseñado y construido para lograr el embreadamiento necesario para el surgimiento de los esfuerzos residuales, funcionó adecuadamente.

Las variaciones de los esfuerzos residuales antes y después de aplicarle explosivo demostraron que el método propuesto tiene efectividad en el alivio de los esfuerzos residuales en la soldadura. Por ejemplo, la probeta D muestra una tensión inicial de 418.29 MPa sobre el cordón de soldadura, al ser sometida al

tratamiento, el esfuerzo disminuyó hasta 223.37 MPa, lo que representa el 46,6% con respecto a los esfuerzos residuales iniciales. El resultado de esta variación se puede observar en la figura 6, la cual muestra la distribución promedio de las probetas en ambas variantes de los esfuerzos residuales longitudinales, que va desde un valor máximo de tensión en el centro del cordón de soldadura, luego comienza a disminuir a medida que se va separando del mismo, hasta pasar al campo de los esfuerzos residuales de compresión, la suma total de estos esfuerzos es igual a cero.

La diferencia entre utilizar una variante u otra es mínima (disposición sinusoidal variante I o hilos paralelos variante II del cordón detonante); sin embargo, aplicar la variante I (aproximadamente 350 mm de longitud de cordón detonante), tiene ventajas, ya que con menos cantidad de explosivos por metro lineal, se obtienen los mismos resultados que si se aplicara la variante II (aproximadamente 400 mm de longitud de cordón detonante), e inclusive ligeramente mejor. Esto se observó, por ejemplo, en la probeta C con disposición sinusoidal, de 406.83 MPa disminuyó a 166.08 MPa, lo

que representó un 59.2% de atenuación de los esfuerzos residuales iniciales.

Tabla 3. Valores de los esfuerzos residuales longitudinales σ_x (MPa).

Probetas en la variante de disposición sinusoidal del cordón detonante									
Distancia al centro (eje) del Cordón de Soldadura (mm)	Probeta A			Probeta B			Probeta C		
	Antes	Después	%	Antes	Después	%	Antes	Después	%
	0	383,96	177,55	53,8	372,48	163,22	56,2	406,83	166,08
10	309,49	166,09	46,3	298,01	154,03	48,3	292,27	154,63	47,1
20	-28,62	-45,79	60,0	-22,89	-45,79	100,0	28,62	40,07	40,0
30	-183,29	-103,06	43,8	-183,29	-97,33	46,9	171,83	103,06	40,0
40	-177,56	-68,70	61,3	-171,83	-62,97	63,4	200,49	62,97	68,6
50	-131,71	-62,97	52,2	-120,25	-57,24	52,4	189,02	57,24	69,7
60	-103,06	-57,24	44,5	-131,71	-45,79	65,2	166,09	45,79	72,4

Probetas en la variante de disposición dos hilos paralelos del cordón detonante									
Distancia al centro (eje) del Cordón de Soldadura (mm)	Probeta D			Probeta E			Probeta F		
	Antes	Después	%	Antes	Después	%	Antes	Después	%
	0	418,29	223,37	46,6	401,1	209,03	47,9	395,43	220,50
10	298,01	183,29	38,5	286,54	166,09	42,0	309,49	177,56	42,6
20	40,07	11,45	71,4	22,89	5,72	75,0	28,62	5,73	80,0
30	171,83	97,33	43,4	160,36	91,6	42,9	183,29	91,60	50,0
40	200,49	68,70	65,7	206,22	80,15	61,1	200,49	80,15	60,0
50	194,76	28,62	85,3	194,76	17,17	91,2	120,25	17,17	85,7
60	177,56	5,74	96,8	183,29	5,72	96,9	103,06	0,00	100

El efecto de mejorar las propiedades de las uniones soldadas en sentido general se logra porque la onda de choque de compresión, que resulta de la detonación de la carga explosiva, colocada sobre la zona afectada térmicamente, provoca deformaciones plásticas locales del metal, llevando al recalado en las capas

superficiales y esfuerzos residuales de compresión. Además, bajo la acción de la carga explosiva cambia el campo de esfuerzos residuales en un volumen comparativamente grande de la unión soldada (Jinxiang, et al, 2005 y Petushkov, et al, 2001).

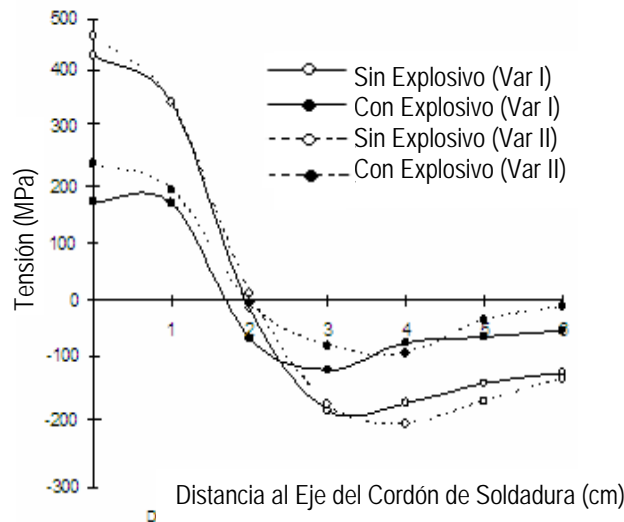


Figura 6. Distribución de los esfuerzos residuales

CONCLUSIONES

El rango de variación de los esfuerzos residuales, al aplicarle el tratamiento con explosivo, demostró que las probetas disminuyeron entre un 50-60 % en su nivel de esfuerzos residuales, lo cual demuestra la efectividad del método evaluado.

Entre las dos variantes utilizadas (disposición sinusoidal y dos hilos paralelos del cordón detonante), la más efectiva y a su vez la más económica es la variante I (disposición sinusoidal), ya que con menor consumo de explosivos por metro lineal, se obtienen resultados similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSI/AWS A5.1-91, (1991) *Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. Miami, Fla.: American Welding Society.
- ASTM A36/A36M-04 (2004) *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. West Conshohocken, PA.: American Society of Testing and Materials.
- Didyk R. P. et al., (1994) "Explosive treatment as a means of redistribution of residual stresses in machine parts" en *Problemy Prochnosti*. No. 11, pp. 50-54.
- Frolov, V. V. (1988) *Teoría de los procesos de soldadura*, Editorial Escuela Superior, Moscú, pp. 425-430
- Glizmanenko, D.L., (1968) *Soldadura y Corte de los Metales*. Instituto del Libro, La Habana, pp. 124-145.
- Guliaev, A. P., (1977) *Metalografía*. Tomo II, Editorial MIR Moscú, pp. 163-176.
- Jinxiang Z. et al., (2005) "A study on the relief of residual stresses in weldments with explosive treatment" en *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 42 (13), Pages 3794-3806.
- Josef Kohler y Rudolf Meyer, (1987) *Explosives*. 3rd edition, VHC Publishers, New York. pp. 83.
- Kandil, F.A., Lord, J.D., Fry, A.T. e Grant, P.V., (2001), *A Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Technique Selection*, NPL Materials Centre, UK.
- Masubuchi, K., (1980) *Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion, and their consequences*. Massachusetts Institute of Technology, USA, pp.88-110, pp. 112-145, pp. 148-187, pp. 328-335.
- Mead, D.J., (2003) "Vibration and Buckling of Flat Free-Free Plates under non-Uniform in-Plane Thermal Stresses" en *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 260, pp. 141-165.
- Mochizuki, M. et al. (2005). "Fundamental study of thermal stress generation during welding heat cycles. Studies on numerical simulation of temperature, microstructure and thermal stress histories during welding, and their application to welded structures" en *Welding International*. Vol. 19 (9), pp. 702-710.
- NOM-005-STPS-1998, (1998), "Condiciones de Seguridad e Higiene en los Centros de Trabajo para el Manejo, Transporte y Almacenamiento de Sustancias Químicas Peligrosas" en *Diario Oficial de la Federación*. 15 de mayo de 1998. México.
- Petushkof, G., Kudinof, B. M., Trufiakof, B. Y., (1976). "Parámetros de cargas de sustancias explosivas para eliminación de tensiones residuales soldadas a tope" en *Avtomatichescaia Esvarca*. No 1.
- Petushkov V.G., (2003) "Peculiarities of explosion treatment of the circumferential weld on pipe filled with liquid." en *Paton Welding Journal*. No.6, pp. 14-16.
- Titov V.A., Bryzgalin A.G. and Petushkov V.G. (2002), "Limiting thickness of welded joints to be explosion treated." en *Paton Welding Journal*. No.1, pp. 20-27.
- Petushkov, V.G. and Titov, V.A., (2001) "Parameters of shock-wave loading used to relieve residual welding stresses by explosion treatment" en *Paton Welding Journal*. No. 4, pp. 57.
- Petushkov V.G., (2003) "Residual stresses in explosion treated pipes" en *Paton Welding Journal*. No. 12, pp. 2.
- POBLET, M. J. Y OTROS, (1983) "Transductores y medidores electrónicos" en *Revista Mundo Electrónico* 2da edición.
- Schmidt, C. G. y Shockey, D. A., (1992) "Reducción de tensiones residuales en juntas soldadas con tratamientos con explosivo" en *Suplemento de la Welding Journal*. Diciembre, pp. 443-446.
- Trufiakov, B. I., et al., (1976) "Aumento de la resistencia al agotamiento de las uniones soldadas, con la utilización de cargas explosivas." en *Paton Welding Journal*. No.5, pp. 32.
- Withers, P. J. e Bhadeshia, H. K. D. H., (2001) "Residual Stress – I: Measurement techniques" en *Materials Science and Technology*. Vol. 17, pp. 355-365.

Este documento se debe citar como:

García Jacomino J. L., Burgos Sola J., Cruz Crespo A., Álvarez Luna M., García Arteaga J. (2008). **Reducción de esfuerzos residuales en uniones soldadas usando tratamiento con explosivo**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-1, pp. 5-12, ISSN: 1665-529X