

# Determinación de esfuerzos residuales en uniones soldadas de placa de acero inoxidable

Mario Acosta-Flores<sup>1</sup>, Moisés Montiel-González<sup>1</sup>, Eusebio Jiménez-López<sup>2</sup>, Sergio Serna Barquera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS  
<sup>2</sup> UNIVERSIDAD LA SALLE NOROESTE-UTS-IIMM

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7496>

## 1. INTRODUCCIÓN

Las fuerzas internas que se generan en elementos y estructuras mecánicas como resultado de los procesos de manufactura con el que se fabrican y que son independientes de las cargas externas, son llamados *esfuerzos residuales*. La soldadura por arco eléctrico es el proceso de fabricación más común en la unión de piezas metálicas. Las uniones por soldadura producen altos esfuerzos residuales debido a los altos gradientes de temperatura que se generan. La evaluación de estos esfuerzos es importante pues dependiendo de sus magnitudes y sentidos pueden ser perjudiciales y en muchos casos contribuyen a fallas estructurales por fatiga.

En la actualidad existen diversos métodos para la determinación de esfuerzos residuales, como por ejemplo el de *difracción de rayos X* y mediante el *ruido de Barkhausen* [1]. Sin embargo, el método del *barreno ciego* es el más ampliamente utilizado, y para su correcta aplicación se requiere del uso de alguna técnica experimental con la cual sea posible determinar el campo de deformaciones alrededor del barreno [2, 3]. En [4] se describen las principales técnicas y métodos de medición de esfuerzos residuales. El método del barreno ciego se encuentra fundamentado en la norma ASTM E837 - 08e1 [5]; este método es aplicable en aquellos casos donde la distribución de esfuerzos es homogénea y también se puede aplicar para zonas definidas como de esfuerzos planos o incluso cuando existe variación a través del espesor de la pieza de

análisis [6]. Para estudios relacionados con soldaduras, en [7] se determinaron los esfuerzos residuales generados por un proceso de soldadura a diferentes distancias del centro del cordón. En dicho estudio se utilizó el método del barreno ciego y el material analizado fue acero inoxidable austenítico AISI 304 de 6,35 mm de espesor. En [8] se determinaron los niveles y la distribución de esfuerzos residuales en probetas fabricadas con placas delgadas de acero inoxidable roladas en caliente, soldadas por el proceso SMAW; en este estudio se utilizó el método de seccionamiento. Para evaluar los efectos termo-mecánicos ocasionados por las múltiples pasadas y la deposición de soldadura, en [9 y 10] se desarrollaron estudios numéricos y experimentales en el que se analizaron los efectos que tienen en el nivel de esfuerzos residuales en placas de acero inoxidable, así como el orden y la dirección de los mismos durante la deposición de los cordones de soldadura.

En este artículo se presenta una metodología sistemática experimental para el análisis y determinación de esfuerzos residuales en probetas soldadas de tubos de acero inoxidable AISI 347 de 3 pulgadas de espesor. Este estudio es importante para el diseño de equipos y estructuras mecánicas, cuya fabricación requiera de uniones soldadas. El análisis se realizó en diferentes puntos con el propósito de evaluar en forma cuantitativa y cualitativa los esfuerzos residuales que se producen como resultado del

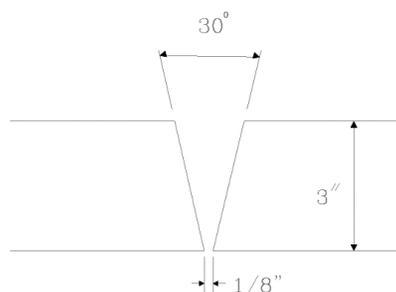


Fig. 1: Borde soldado

proceso de soldadura. Para determinar los esfuerzos residuales en diferentes puntos se utilizaron rosetas de deformación y se aplicó la técnica del barreno ciego [6].

## 2. MATERIALES Y DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL

### 2.1. MATERIALES

El material utilizado para el análisis de esfuerzos residuales, que se producen en uniones soldadas por soldadura de arco eléctrico, fue acero inoxidable AISI 347. En la Figura 1 se muestra el esquema con las dimensiones del borde soldado. Se fabricaron dos probetas (PJ1 y PJ2) extraídas de una sección de un tubo de 3 pulgadas de espesor, como se observa en la Figura 2. La probeta PJ1 fue soldada de acuerdo con el procedimiento de soldadura WPS-02, mediante el proceso de soldadura GTAW-SMAW de tipo manual. La probeta PJ2 fue soldada mediante un procedimiento de soldadura GTAW de tipo manual y el material de aporte fue considerado con una especificación SFA 5.4-E 347-16.

La metodología utilizada para la determinación experimental de esfuerzos residuales en placas gruesas de acero inoxidable soldadas, que integra el método del barreno ciego y el uso de extensómetros eléctricos para la medición de deformaciones, es la siguiente:

- I) Se soldaron las placas y posteriormente se cortaron las probetas. La unión soldada en la probeta PJ1 en vista frontal, lateral y posterior, se muestra en la Figura 2.
- II) Se identificaron las diversas zonas propensas a contener esfuerzos residuales relevantes y los puntos en los que éstos se determinarían.
- III) Se seleccionaron extensómetros eléctricos tipo roseta y se instrumentaron en las zonas de interés con base en la norma ASTM E837 - 08e1.



Fig. 2: Probeta PJ1 para el análisis de esfuerzos residuales

- IV) Se seleccionó la fresa adecuada para realizar los barrenos y se determinó la profundidad de barrenado.
- V) Se llevaron a cabo las pruebas experimentales con el equipo modelo RS-200, el cual permite realizar los barrenos con precisión.
- VI) Se llevó a cabo un registro de las deformaciones experimentales proporcionados por las rosetas durante el barrenado con un equipo indicador de deformaciones modelo P-3.
- VII) Se calcularon los esfuerzos residuales correspondientes a los puntos instrumentados mediante las ecuaciones analíticas respectivas.

## 2.2. INSTRUMENTACIÓN

Los niveles de esfuerzos se determinaron en cuatro diferentes puntos de las probetas mencionadas (PJ1 y PJ2), como se muestra en la Figura 3, y se utilizó el método del barreno ciego con las especificaciones descritas en la Norma ASTM E837 - 08e1 [5]. La selección

de dichos puntos se describe como sigue: P1 se localiza en el borde de soldadura final, P2 está ubicado en medio del cordón de soldadura y P4 está localizado en borde de cordón donde inicia el proceso. Como referencia se instrumentó el punto P3 el cual está ubicado a la mitad del cordón, en la sección lateral de las probetas, Figura 3.

La prueba experimental consistió en hacer un pequeño barreno en el punto de interés con una fresa. Este proceso provoca que se relaje la zona de análisis. El diámetro y profundidad del barreno se encuentra estandarizado en la Norma ASTM E837 - 08e1 [5]. Los efectos de la relajación se analizaron a partir de las deformaciones obtenidas mediante un extensómetro eléctrico de resistencia variable tipo roseta. En la Tabla 1 se presenta la denominación de los puntos instrumentados para cada una de las probetas estudiadas.

Los puntos descritos en la Tabla 1 se instrumentaron con extensómetros eléctricos

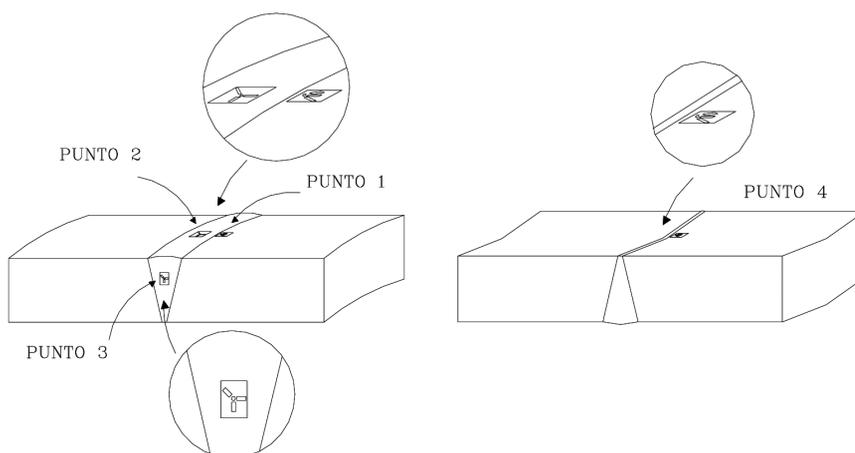


Fig. 3: Puntos instrumentados en las probetas PJ1 y PJ2

de los puntos de interés se realizó para mostrar experimentalmente los niveles de esfuerzos que se producen por el efecto del proceso de soldadura en una placa gruesa de acero inoxidable y considerando también aquellas zonas que, como resultado del proceso de soldadura, pueden presentar el mayor nivel de

esfuerzos (puntos 1, 2 y 4). La localización de dichos puntos se describe como sigue: P1 se localiza en el borde de soldadura final, P2 está ubicado en medio del cordón de soldadura y P4 está localizado en borde de cordón donde inicia el proceso. Como referencia se instrumentó el punto P3 el cual está ubicado a la mitad del cordón, en la sección lateral de las probetas, Figura 3.

Probeta	Puntos Instrumentados			
	1	2	3	4
PJ1	PJ11	PJ12	PJ13	PJ14
PJ2	PJ21	PJ22	PJ23	PJ24

Tabla 1: Definición de los puntos instrumentados en cada probeta

esfuerzos máximos se tomó en cuenta la configuración que se observa en la Figura 4. Esta configuración muestra la convención en que deben ser instrumentadas las rosetas.

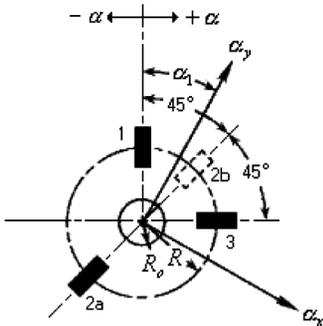


Fig. 4: Convención de las rosetas instrumentadas de acuerdo con la norma ASTM Standard E837

Los puntos instrumentados relacionados con la probeta PJ1 se muestran en la Figura 5, en tanto que los puntos asociados con la probeta PJ2 se muestran en la Figura 6.

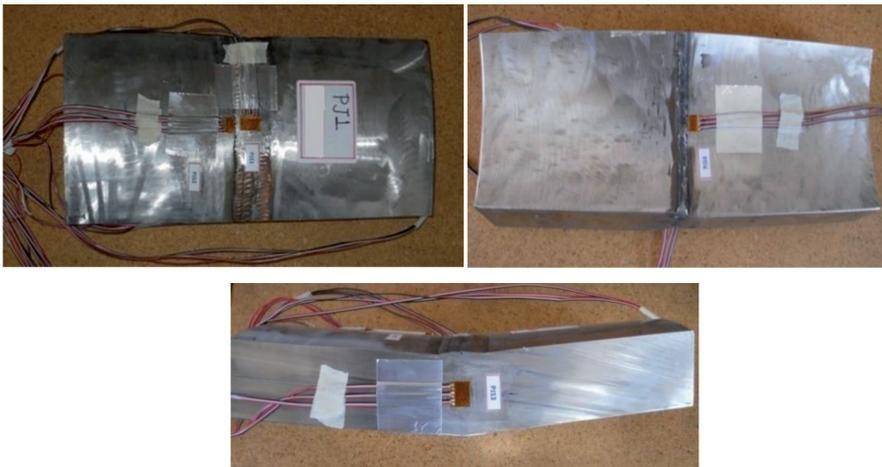


Fig. 5: Instrumentación de la probeta PJ1

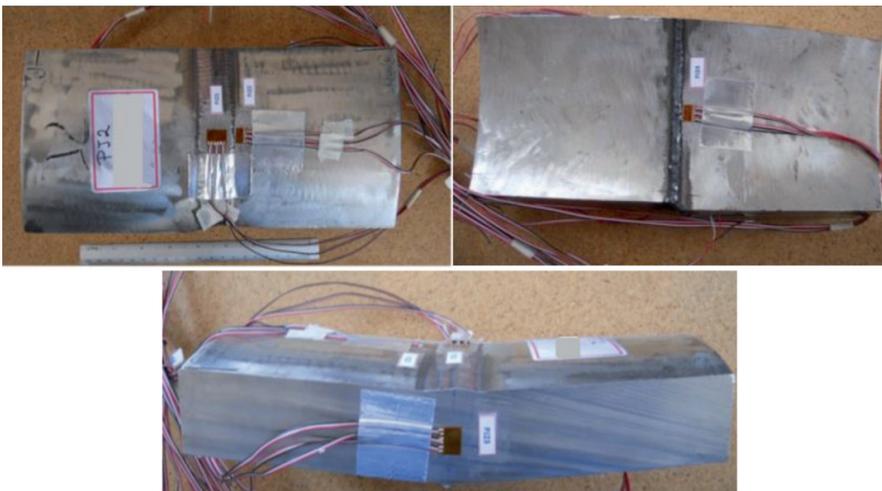


Fig. 6: Instrumentación de la probeta PJ2

Tipo de Roseta	Diámetro entre extensómetros (D), pulg (mm)	Diámetro de barreno recomendado ( $D_0$ ), pulg (mm)	
		Min.	Max.
031RE	0.101 (2.56)	0.03 (0.8)	0.04 (1.0)
062RE	0.202 (5.13)	0.06 (1.5)	0.09 (2.3)
125RE	0.404 (10.26)	0.12 (3.0)	0.18 (4.6)
062RK	0.202 (5.13)	0.06 (1.5)	0.09 (2.3)
062UM	0.202 (5.13)	0.06 (1.5)	0.09 (2.3)

Tabla 2: Diámetros de barrenos recomendados en la nota técnica TN-503 [12]

### 2.3. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para llevar a cabo el análisis de esfuerzos residuales se utilizó un equipo



Fig. 7: Herramental fabricado para facilitar el montaje del equipo RS-200

especial Modelo RS-200 [11]. Cabe mencionar que debido a la geometría de las probetas resultantes después del proceso de soldado, fue necesario fabricar un herramental auxiliar para poder fijar las probetas y montar el equipo, Figura 7.

El diámetro de la fresa ( $D_0$ ) utilizada para hacer el barreno se seleccionó con base en lo establecido por la norma ASTM Standard E837 [5]; el tipo de rosetas utilizadas fue 062UM y se tomó en cuenta el manual de instrucciones del equipo RS-200 [11]. El diámetro seleccionado para el proceso de barrenado fue  $D_0 = 0.06$  pulgadas (1.5 mm), como se observa en la Tabla 2 para el tipo de roseta.

Se tomaron cuatro lecturas para cada uno de los puntos instrumentados utilizando el indicador de deformaciones P-3 en las siguientes profundidades: a 0.5 mm, a 1 mm, a 1.5 mm y a 2 mm de profundidad de barrenado. Esta última es la profundidad máxima de barrenado, la cual se determinó con base en la Figura 8 y tomando en consideración la ecuación (1), tal y como lo establece la norma ASTM Standard E837 [5].

$$Z / D = 0.4 \tag{1}$$

Donde D es el diámetro entre extensómetros y Z es la profundidad de barrenado. Para el presente caso  $D = 5$  mm, por lo que  $Z = 2$  mm.

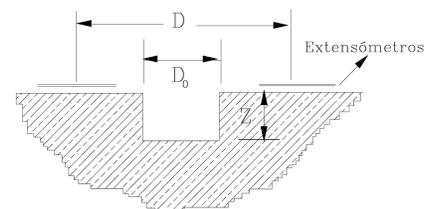


Fig. 8: Dimensiones del diámetro de extensómetros, diámetro de barreno y profundidad de barrenado

Se tomaron cuatro lecturas para cada uno de los puntos instrumentados

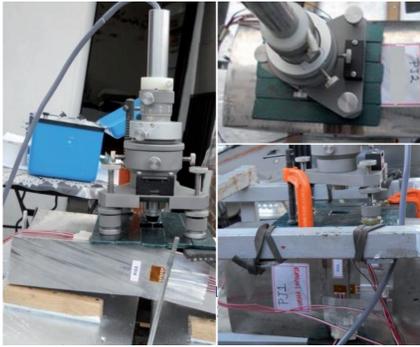


Fig. 9: Pruebas experimentales realizadas en los puntos PJ24, PJ22 y PJ13

utilizado el indicador de deformaciones P-3 en las siguientes profundidades: a 0.5 mm, a 1 mm, a 1.5 mm y a 2 mm de profundidad de barrenado. Esta última es la profundidad máxima de barrenado, la cual se determinó con base en la Figura 8 y tomando en consideración la ecuación (1), tal y como lo establece la norma ASTM Standard E837 [5].

Las pruebas se realizaron para cada una de las probetas, las cuales se posi-

cionaron a un mismo nivel y se ubicó el equipo RS-200 para barrenar en el punto señalado por las rosetas utilizadas, como se muestra en la Figura 9.

Las Figuras 10 y 11 muestran los barrenos realizados en los puntos instrumentados en las probetas PJ1 y PJ2, respectivamente.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. DETERMINACIÓN DE DEFORMACIONES RESIDUALES

Las Tablas 3 y 4 muestran los resultados de las deformaciones obtenidas por medio del análisis experimental en cada punto instrumentado con extensómetros tipo roseta. Los valores corresponden a cada punto analizado y para las profundidades de barrenado: 0.5 mm, a 1 mm, a 1.5 mm y a 2 mm. El valor de las deformaciones se obtuvo en forma directa por el equipo indicador de deformaciones P-3.

Los valores de las deformaciones descritos en las Tablas 3 y 4 representan en forma inversa lo que sucede realmente en los puntos instrumentados, lo que significa que si son negativos no necesariamente se tendrán esfuerzos de compresión.

#### 3.2. DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DE ESFUERZOS RESIDUALES

Para determinar la deformación radial proporcionada por los extensómetros de la roseta se requiere resolver el



Fig. 10: Puntos barrenados y analizados experimentalmente en la probeta PJ1



Fig. 11: Puntos barrenados y analizados experimentalmente en la probeta PJ2

Punto	PJ11			PJ12			PJ13			PJ14		
	e1 ( $\mu\epsilon$ )	e2 ( $\mu\epsilon$ )	e3 ( $\mu\epsilon$ )	e1 ( $\mu\epsilon$ )	e2 ( $\mu\epsilon$ )	e3 ( $\mu\epsilon$ )	e1 ( $\mu\epsilon$ )	e2 ( $\mu\epsilon$ )	e3 ( $\mu\epsilon$ )	e1 ( $\mu\epsilon$ )	e2 ( $\mu\epsilon$ )	e3 ( $\mu\epsilon$ )
0.5	-249	-158	-109	-108	-78	-220	-64	11	52	-257	-362	-185
1	-466	-257	-167	-176	-112	-377	-71	6	22	-505	-697	-335
1.5	-543	-305	-166	-211	-95	-434	-60	15	20	-548	-800	-371
2	-550	-301	-153	-205	-83	-452	-51	18	-44	-565	-878	-414

Tabla 3: Resultados obtenidos para los puntos analizados en la probeta PJ1

Punto	PJ21			PJ22			PJ23			PJ24		
	e1 ( $\mu\epsilon$ )	e2 ( $\mu\epsilon$ )	e3 ( $\mu\epsilon$ )	e1 ( $\mu\epsilon$ )	e2 ( $\mu\epsilon$ )	e3 ( $\mu\epsilon$ )	e1 ( $\mu\epsilon$ )	e2 ( $\mu\epsilon$ )	e3 ( $\mu\epsilon$ )	e1 ( $\mu\epsilon$ )	e2 ( $\mu\epsilon$ )	e3 ( $\mu\epsilon$ )
0.5	-84	-29	-26	-233	-296	-250	-14	26	140	-326	-210	-264
1	-235	-124	-123	-240	-313	-260	-70	-15	103	-592	-596	-507
1.5	-292	-148	-142	-291	-356	-300	-83	-29	52	-672	-751	-585
2	-312	-123	-121	-281	-380	-302	-59	-42	37	-703	-826	-613

Tabla 4: Resultados obtenidos para los puntos analizados en la probeta PJ2

siguiente sistema de ecuaciones constitutivas:

$$\epsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \tag{2}$$

$$\epsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 45^\circ) \tag{3}$$

$$\epsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 90^\circ) \tag{4}$$

Posteriormente, se determinan los valores de esfuerzos normales y los principales (esfuerzos máximos en planos donde los esfuerzos cortantes son iguales a cero) utilizando las expresiones (5) y (6) y tomando en cuenta la recomendación de la Norma ASTM E837 - 08e1 (considerando valores de profundidad de barrenado de 2 mm, valor donde

la relajación de esfuerzos producida por el barrenado es completa).

Los términos  $\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$  de las expresiones (5) y (6), corresponden a la magnitud de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ) para un punto con estado de esfuerzos planos. Las deformaciones  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  corresponden a las proporcionadas por los elementos de las rosetas 1, 2 y 3, respectivamente.

Asumiendo que las deformaciones

radiales y tangenciales varían en forma senoidal, se definen los coeficientes  $A$  y  $B$ , los cuales se obtienen a partir de la nota técnica de Visahy TN-503 [12], de la correcta interpretación de la Figura 12 y de las ecuaciones (7) y (8) para el material y tipo de extensómetro utilizado. Si se considera el diámetro  $D = 5$  mm y  $D_0 = 1.6$  (1/16 pulg), se tiene que  $D_0/D = 0.32$ , valor con el que se obtuvieron  $\bar{a}$  y  $\bar{b}$ .

$$A = -\frac{1 + \nu}{2E} * \bar{a} \tag{5}$$

$$B = -\frac{1}{2E} * \bar{b} \tag{6}$$

En la Tabla 5 se muestran las constantes elásticas del acero inoxidable y los coeficientes  $\bar{a}$  y  $\bar{b}$ , estas constantes y coeficientes permiten determinar los valores de  $A$  y  $B$  que se presentan en la Tabla 6.

$$\sigma_{max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2} \tag{5}$$

$$\sigma_{min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2} \tag{6}$$

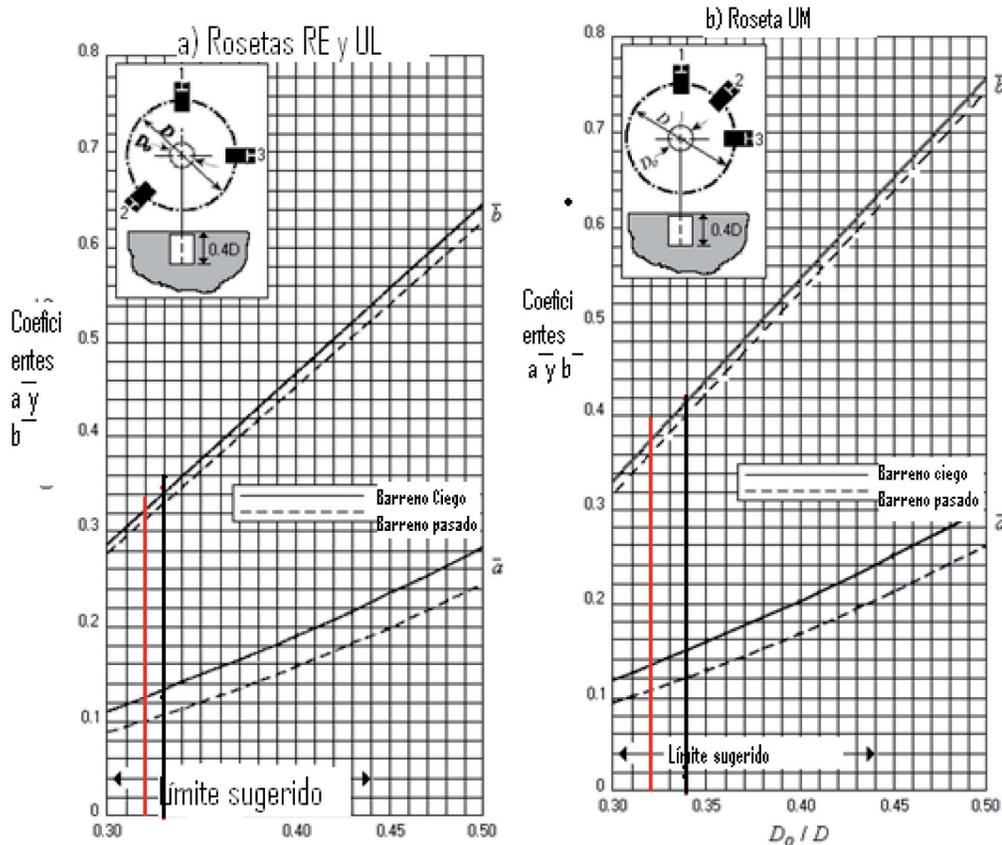


Fig. 12: Diagramas para la obtención de los coeficientes  $\bar{a}$  y  $\bar{b}$ , contra  $D/D_0$ , para rosetas típicas Visahy [12]

	CEA-06-062UL-120	CEA-06-062UM-120
$E$ (Módulo de Young de acero) (Pa)	2.0E+11	2.0E+11
$\nu$ (Relación de Poisson del acero)	0.29	0.29
Coefficiente $\bar{a}$	0.125	0.135
Coefficiente $\bar{b}$	0.325	0.38

Tabla 5: Constantes elásticas del acero inoxidable y coeficientes  $\bar{a}$  y  $\bar{b}$

Coefficientes	Roseta CEA-06-062UL-120	Roseta CEA-06-062UM-120
A	-4.03125E-13	-4.35375E-13
B	-9.0E-13	-9.0E-13

Tabla 6: Coeficientes A y B para las rosetas utilizadas

### 3.3. DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES

Una vez determinados los coeficientes A y B y con las deformaciones medidas experimentalmente, se procedió a calcular los esfuerzos residuales en los puntos instrumentados de las probetas PJ1 y PJ2 utilizando las ecuaciones (5) y (6). En la Tabla 7 se presentan los esfuerzos de fluencia ( $\sigma_{ced}$ ) y la resistencia última ( $\sigma_{ult}$ ) del material de las probetas. De esta tabla es importante puntualizar que si el valor de los esfuerzos residuales sobrepasa los esfuerzos de fluencia, éstos no representan los niveles de esfuerzos reales, debido a que el comportamiento en estos niveles es no lineal y en consecuencia, las ecuaciones (5) y (6) no serían aplicables.

PROBETA	$\sigma_{ced}$ (Mpa)	$\sigma_{ult}$ (Mpa)
PJ1	405	579
PJ2	515	692

Tabla 7: Esfuerzo de fluencia y resistencia última de las probetas

En la Tabla 8 y gráfica de la Figura 13, se presentan los esfuerzos residuales máximos (principales) obtenidos para los puntos instrumentados en las probetas PJ1 y PJ2 (en la Figura 13 muestra los esfuerzos en forma comparativa). Como se explicó previamente, las ecuaciones analíticas (2) y (3) con las que se calculan los esfuerzos residuales, son lineales, por lo tanto, éstas no aplican cuando se rebasa el valor

de esfuerzo de fluencia del material, pues el comportamiento se vuelve no lineal. Sin embargo, aun cuando no representan el valor de esfuerzos reales, si muestra un comparativo cualitativo de la magnitud de esfuerzos más altos.

PROBETA PJ1			PROBETA PJ2		
PUNTOS	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	PUNTOS	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)
PJ11	550	83.6	PJ21	343	34.1
PJ12	530	23	PJ22	384	105
PJ13	95	-5 12	PJ23	45.4	12
PJ14	782	244	PJ24	852	230

Tabla 8: Esfuerzos residuales en los puntos instrumentados en las probetas

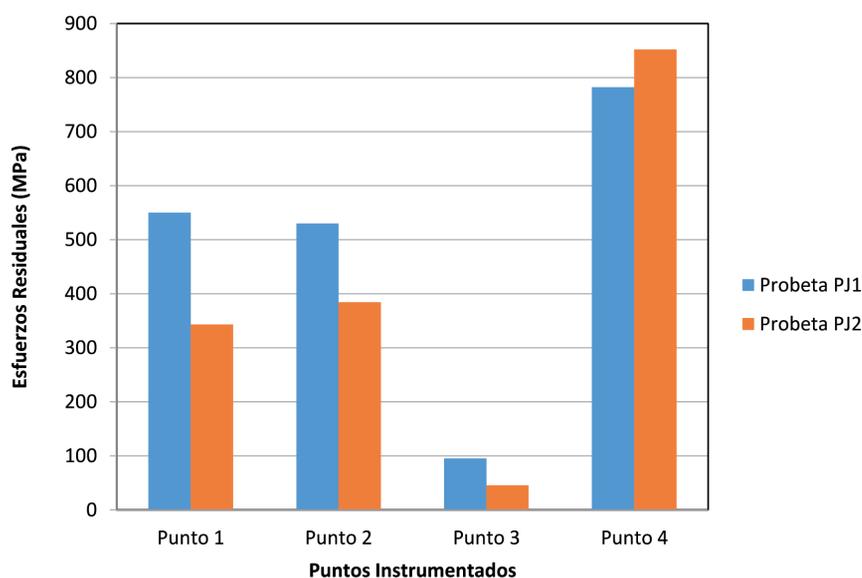


Fig. 13: Esfuerzos máximos obtenidos en los puntos instrumentados de las probetas PJ1 y PJ2

## 4. DISCUSIÓN

Los resultados mostraron en forma real los niveles de deformación y de esfuerzos máximos que se inducen por el proceso de soldadura en placas de acero inoxidable de espesor de 3 pulgadas. Haciendo un análisis de los resultados se observó que los esfuerzos residuales en los puntos PJ11, PJ12, PJ14 y PJ24 son mayores que los esfuerzos de fluencia del material, es decir, se encuentran en la zona plástica, lo que implica una condición no aceptable en diseño mecánico cuando se contempla trabajar con uniones soldadas.

Los niveles de esfuerzos en el punto 4 son el resultado de la aplicación de las múltiples pasadas de cordones de soldadura para unir la placa gruesa de acero inoxidable. Es importante mencionar que la aplicación de cordones de soldadura sobre otros cordones en los que ya se generaron esfuerzos residuales, produce un relevado de esfuerzos por un proceso térmico de recocido, sin embargo, como muestran los resultados, los esfuerzos por tracción térmica prevalecen y no son eliminados como resultado del total de cordones de soldadura.

La magnitud de los esfuerzos residuales determinados en este trabajo no necesariamente corresponderán a las magnitudes que se presentan en la fabricación de una estructura real, esto es debido a que dicha fabricación depende de las condiciones de frontera que prevalecen durante el proceso de aplicación de la soldadura, y en general dichas condiciones no serían las mismas en los diferentes casos.

Por otra parte, es importante señalar que aun cuando en una estructura mecánica se presenten esfuerzos residuales significativos, esto no implica que la estructura fallará en condiciones de trabajo, ya que los niveles de esfuerzos reales se calculan mediante la suma algebraica de esfuerzos residuales, esfuerzos generados por cargas mecánicas de operación y, si fuera el caso, esfuerzos térmicos.

## 5. CONCLUSIONES

Con base en el análisis de resultados y considerando las restricciones que definen el alcance del estudio realizado, se presentan las siguientes conclusiones.

- a) El estudio mostró los niveles de esfuerzos que se producen por la unión de placas gruesas de acero inoxidable como consecuencia de la aplicación de altos gradientes de temperatura en la zona soldada y por las restricciones existentes a la libre expansión y contracción. En la Tabla 8 se presentaron los resultados obtenidos en diferentes puntos de un cordón de soldadura, los cuales en general son significativos. En dicha tabla se observa que en el punto 4 los niveles de esfuerzo de fluencia fueron rebasados. Es importante el estudio de esfuerzos residuales en uniones soldadas en placas gruesas de acero inoxidable.
- b) Del estudio experimental se observó que los puntos PJ11, PJ12 y PJ14 de la probeta PJ1, así como el punto PJ24 de la probeta PJ2, presentaron valores de esfuerzos residuales mayores a los esfuerzos de fluencia, lo cual no es admisible en diseño de elementos mecánicos.
- c) Los métodos del barrenado ciego [4, 13] y de extensometría eléctrica [6] son confiables en la medición de esfuerzos residuales en placas soldadas.
- d) La metodología utilizada en este trabajo, está fundamentada en la norma ASTM Standard E837 [5] y puede ser utilizada como base para estudios de esfuerzos residuales en estructuras mecánicas que contengan uniones soldadas, con diferentes materiales y que durante su operación trabajen con diferentes condiciones de frontera.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos por el financiamiento y apoyo otorgados al Cuerpo Académico "Ingeniería Mecánica" para la realización de la presente investigación.

## PARA SABER MÁS

- [1] Lindgren, M., Lepistö T. "Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel", *NDT & E International*, 2003, Vol. 36, p. 279–288. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00002-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00002-1)
- [2] A.J. Durelli. *Introduction to the Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Strain*. McGraw-Hill, 1958.
- [3] Shah Khan, M. Z., Saunders, D. S., Baldwin, et al. "An Investigation of the Use of Strain Gages to Measure Welding-induced Residual Stresses". *Experimental Mechanics*, 1997, Vol.

- 37–3, p. 264–271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02317417>
- [4] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia. "Residual stress. Part 1 – Measurement techniques". *Materials Science and Technology*, 2001, Vol. 17–4, p. 355–365. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/026708301101509980>
- [5] ASTM Standard E837. "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by Hole-drilling Strain Gage Method". ASTM, Philadelphia, 1995. PA, USA.
- [6] Flaman, M.T., Manning, B.H. "Determination of Residual Stress Variation with Depth by the Hole-Drilling Method", *Experimental Mechanics*, 1985, Vol. 25–3, p. 205–207. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02325088>
- [7] Mejía, C. Maldonado, A. Bedolla, Ch. J. García. (2006). "Esfuerzos Residuales Generados en la Soldadura de Placas de Acero Inoxidable AISI 304 Mediante el proceso SMAW". CONAMET/SAM.
- [8] Yuan, H. X., Wang, Y. Q., Shi, et al., "Residual Stress Distributions in Welded Stainless Steel Sections". *Thin-Walled Structures*, 2014, Vol. 79, p. 38–51. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2014.01.022>
- [9] Deng, D., Kiyoshima, S. "FEM analysis of residual stress distribution near weld start/end location in thick plates", *Computational Materials Science*, 2011, Vol. 50, p. 2459–2469. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.03.027>
- [10] Liang, W., Murakawa, H., Deng, D. "Investigation of welding residual stress distribution in a thick-plate joint with an emphasis on the features near weld end-start", *Materials & Design*, 2015, Vol. 67, p. 303–312. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.037>
- [11] Instructions Manual, Model RS-200.
- [12] Visahy TN-503 Residual Stress Measurement.
- [13] París F., Cañas J., Fernández M. (1995). "Medida de tensiones en estructuras metálicas mediante ultrasonido". *Dyna*. Abril 1995 Vol. 70 No 3. Pp. 47–51.