



Variación de las tensiones residuales de soldadura durante la acción de cargas cíclicas

Variation of residual welding stresses during the action of cyclic loads

Pavel-Michel Almaguer-Zaldivar^{1*} , Marla Berenice Hernández Hernández² , Patricia Zambrano³ ,
José Cabral Miramontes³ , Josué Amilcar Aguilar Martínez² 

1. Universidad de Holguín, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios CAD/CAM. Holguín, Cuba.

2. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Apodaca, Nuevo León, México.

3. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica. Apodaca, Nuevo León, México.

* Autor de correspondencia: pavel@uho.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](#)



Recibido: 8 de marzo de 2025

Aceptado: 25 de abril de 2025

Publicado: 28 de abril de 2025

Resumen

Las tensiones residuales influyen en el comportamiento a fatiga de la unión soldada. El objetivo de este trabajo fue medir, mediante difracción de rayos X, la variación de las tensiones residuales de soldadura en una posición cercana a la zona de afectación térmica de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 solicitada a cargas cíclicas. Para ello se propuso un procedimiento que fue desarrollado en este caso de estudio. Los ensayos mecánicos se realizaron en una máquina universal MTS810, mientras que las tensiones residuales se midieron con un difractómetro PANalytical modelo Empyrean. Se determinaron los parámetros del ciclo de carga de fatiga. Para conocer en que rango debía hacerse la medición de las tensiones residuales, se corrió primero

una muestra del material base. Las tensiones residuales se midieron antes de comenzar a aplicar las cargas cíclicas y posteriormente se volvieron a medir cada 2 500 ciclos de carga. Como principal resultado de la aplicación de este procedimiento a la unión estudiada, se obtuvo que en la posición analizada, las tensiones residuales estaban a compresión, variaron bruscamente durante los primeros 2 500 ciclos de carga y después se mantuvieron prácticamente sin cambios.

Palabras claves: tensiones residuales, cargas cíclicas, difracción de rayos X, unión soldada.

Abstract

Residual stresses influence the fatigue behavior of the welded joint. The aim of this work is to measure the welding residual stresses using X-ray diffraction in a position close to the heat-affected zone of a butt weld of AISI 1015 steel subjected to cyclic loads. To achieve this, a procedure was proposed and developed for this case study. Mechanical tests were performed on an MTS810 universal testing machine, while the residual stresses were measured with an diffractometer PANalytical model Empyrean. The fatigue load cycle parameters were determined. In order to know the range in which the measurement of residual stresses should

be conducted, a sample of the base material was first tested. Residual stresses were measured before starting to apply the cyclic loads and were subsequently measured again every 2,500 loading cycles. As a main result of applying this procedure to the studied joint, it was found that at the analyzed position, the residual stresses were in compression and increased in absolute value with the action of the cyclic loads.

Key words: residual stresses, cyclic loads, X-ray diffraction, welded joint.

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Almaguer Zaldivar PM, Hernández Hernández MB, Zambrano P, Cabral Miramontes J, Aguilar Martínez JA. Variación de las tensiones residuales de soldadura durante la acción de cargas cíclicas. Ingeniería Mecánica. 2025;28:e710. <https://go.su/CJIPN>

1. Introducción

Las tensiones residuales de soldadura (σ_{res}) pueden influir en la respuesta a la fatiga de las uniones soldadas. Las tensiones residuales que se desarrollan durante la producción de las piezas y estructuras afectan la integridad estructural del material [1]. Un método clásico para determinar las tensiones residuales es la difracción de rayos X [2]. Este método proporciona la primera información acerca de las fases del material, la estructura cristalina, el tamaño promedio de los cristales, la micro y macro deformación, el parámetro de orientación, el

coeficiente de textura, los defectos cristalinos, etc. Además, este análisis proporciona información sobre la materia, películas delgadas policristalinas y estructuras multicapa, lo cual es muy importante en diversos campos de la ciencia y la ingeniería de materiales [3].

La resistencia a la fatiga de las uniones soldadas se determina típicamente por la propagación de grietas en aquellas zonas de alta concentración de tensiones, como en la raíz y el pie de la soldadura. Debido a la concentración de tensiones, las grietas son propensas a ocurrir en la zona de soldadura, donde también existen tensiones residuales. Estas tensiones pueden influir en el comportamiento a la fatiga dependiendo de su magnitud y signo [4]. Los hallazgos experimentales y numéricos demuestran que la carga de amplitud variable y la sobrecarga imponen efectos significativos en la evolución de las tensiones residuales durante los ensayos de carga cíclica [5]. La tensión residual de compresión en una unión soldada puede beneficiar o comprometer la integridad estructural [6, 7], esto fue corroborado en [8].

La determinación precisa de las tensiones residuales tiene un papel crucial en la comprensión de las complejas interacciones entre la microestructura, el estado mecánico, los modos de fallo y la integridad estructural. Sin embargo, descuidar el efecto de las tensiones residuales de soldadura y solo considerar las tensiones cíclicas puede disminuir la precisión de las evaluaciones de la vida a fatiga [9]. Una forma de mejorar el rendimiento de las estructuras es inducir tensiones residuales de compresión. Este puede ser realizado por medio de procesos mecánicos durante el servicio, lo que puede llevar a una pérdida de su efectividad. La relajación inducida por fatiga de las tensiones residuales probablemente resultará en una redistribución de los valores originales de estas, resultando en el movimiento de dislocaciones y alteración de su configuración [10]. Este es un aspecto importante para medir las tensiones residuales en piezas en servicio.

En los párrafos anteriores, el tema de las tensiones residuales de soldadura requiere la atención de numerosos investigadores debido a los efectos que pueden tener en el comportamiento mecánico de las uniones soldadas, tanto bajo la acción de cargas estáticas como dinámicas. El objetivo de este trabajo fue medir mediante difracción de rayos X, la variación de las tensiones residuales de soldadura en una posición cercana a la zona de afectación térmica de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 solicitada a cargas cíclicas. Los ensayos mecánicos se realizaron en una máquina universal de ensayos MTS810, mientras que las tensiones residuales se midieron con un difractómetro modelo XRD; PANalytical Empyrean. Los resultados expresan que en la posición analizada, las tensiones residuales estaban a compresión y aumentaron en valor absoluto con el aumento de los ciclos de carga.

2. Métodos y Materiales

Para desarrollar este trabajo, en el que se miden las tensiones residuales a medida que se aplican cargas cíclicas en una unión soldada de acero AISI 1015 y alambre E71T-1; se utilizaron métodos experimentales y equipamientos que se describen a continuación.

2.1. Medición de tensiones residuales mediante difracción por rayos X

El espaciamiento interplanar de una superficie tensionada es diferente al de una superficie libre de tensiones. Este cambio en el espaciamiento interplanar, a su vez, afecta la reflexión y el índice de refracción del componente terminado durante su uso en aplicaciones ópticas [11]. La difracción de rayos X es una técnica que puede utilizarse con éxito para medir las tensiones residuales, aunque se requieren largos tiempos de medición para obtener un mapa completo de estas. La ley de Bragg expresa la relación entre la longitud de onda de los rayos X λ , la distancia entre los planos de la red cristalina d y el ángulo entre los rayos de incidencia y los planos de dispersión θ , como se muestra en la ecuación (1).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

De esta manera, se puede afirmar que al conocer la longitud de onda de los rayos X y el ángulo de incidencia, es posible determinar el parámetro de la red y, a continuación, relacionarlo con las deformaciones para determinar las tensiones residuales.

Donde:

n : es un entero.

λ : longitud de onda de los rayos X.

d : distancia entre planos de red adyacentes.

θ : ángulo entre el rayo difractado y los planos de dispersión.

Para determinar las tensiones residuales, se utiliza la metodología de precisión del parámetro de red. Es decir, se considera un estado plano de tensión debido a la presencia de tensiones residuales y se cumple la igualdad de las dos tensiones principales. Según esta metodología, se utiliza para determinar la tensión residual [12] la ecuación (2).

$$\sigma = \frac{E}{2\mu} \left(\frac{a - a_0}{a_0} \right) \quad (2)$$

Donde:

E : Módulo de Young.

μ : Coeficiente de Poisson.

a_0 : parámetro de red medido en una probeta sin tensiones.

a : parámetro de red medido en una probeta tensionada.

En este estudio, el valor de a_0 se considerará igual a 0,287 nm, según [13] ese es el valor que corresponde al parámetro de red del hierro α . La estructura metalográfica del material base utilizado se muestra en la figura 1, donde se puede ver que la estructura está compuesta de ferrita y perlita, con predominancia de ferrita.

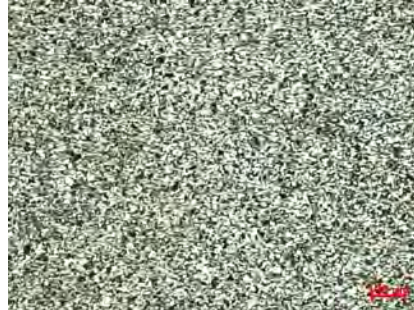


Fig. 1. Estructura metalúrgica del metal base. 50X. Fuente: autores

La deformación unitaria ε de la probeta estudiada puede ser calculada mediante la ecuación (3):

$$\varepsilon = \frac{a - a_0}{a_0} \quad (3)$$

Luego, la deformación ε es relacionada con la tensión σ como se establece en la ecuación (4):

$$\varepsilon = \frac{1+\mu}{E} \sigma \sin^2 \psi - \frac{\mu}{E} 2\sigma \quad (4)$$

Donde:

ψ : es el ángulo que la probeta rota durante la medición de las tensiones residuales mediante la difracción de rayos X. Es el ángulo entre la normal a los planos y la normal de la probeta.

2.2. Procedimiento experimental

Probeta usada para medir las tensiones residuales

La probeta utilizada en esta investigación tiene forma de "hueso de perro", figura 2. En el centro del rectángulo rojo se indica el punto donde se midieron las tensiones residuales. Para fabricar la probeta se utilizó el proceso de soldadura por arco con núcleo fundente (*Flux cored arc welding*, FCAW). La geometría de la probeta, los materiales base, acero AISI 1015 y de aporte, alambre E71T-1, y las propiedades de los materiales son las mismas que se usaron en trabajos anteriores [14].

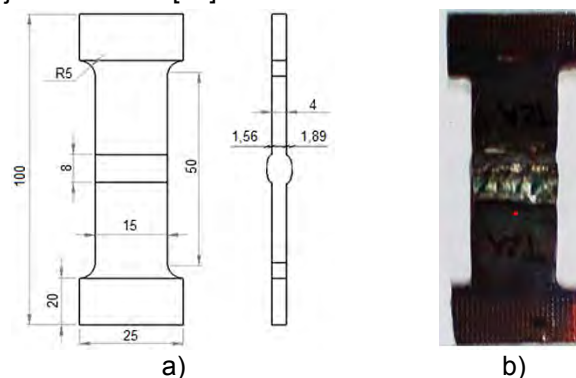


Fig. 2. Probeta de tracción para evaluar la relajación de tensiones residuales,
a) Dimensiones en milímetros. b) Probeta real. Fuente: autores

Dado que el objetivo de esta investigación es determinar la variación de las tensiones residuales en probetas soldadas solicitadas a cargas cíclicas, se determinó la tensión residual en un área cercana a la zona de afectación térmica antes de que se aplicaran los ciclos de carga. Después de este paso, se aplicaron los primeros 2 500 ciclos de carga; luego se detuvo la acción de la carga cíclica y se midieron nuevamente las tensiones residuales. Este procedimiento se repitió hasta alcanzar los 10 000 ciclos de carga. La decisión de aplicar ciclos de carga hasta este valor se basó en la tesis doctoral *Influence of Residual Stress and Heat Affected Zone on Fatigue Failure of Welded Piping Joints* <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/6d485334-983f-4e4a-a9ee-712dc12b393c/content> donde se expone que las tensiones residuales de soldadura se habían relajado hasta un 46 % con respecto al valor inicial con este número de ciclos.

El diagrama de flujo presentado en la figura 3 describe el procedimiento seguido para la medición de las tensiones residuales.

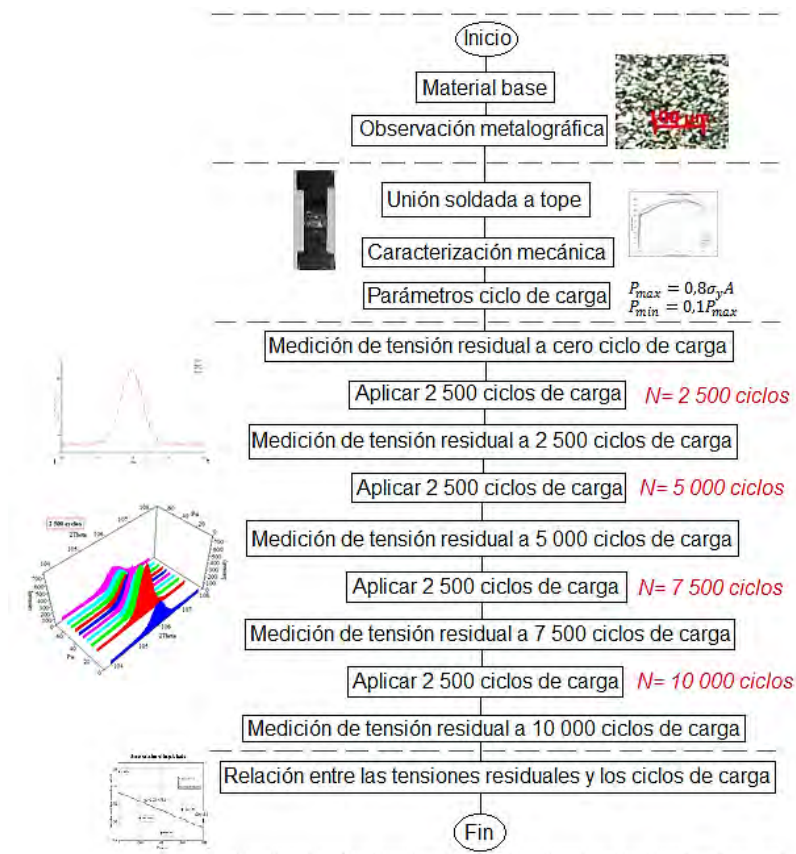


Fig. 3. Procedimiento para medir la variación de las tensiones residuales en la union soldada solicitada por cargas cíclicas. Fuente: autores

La medición de tensiones residuales se realizó en un difractómetro de rayos X (XRD, modelo Empryean, fabricado por la empresa holandesa PANalytical en el año 2015) con radiación $\text{CrK}\alpha_1$ ($\lambda = 2,289 \text{ \AA}$) operado a 45 kV y 40 mA. Se utilizó una máquina hidráulica MTS810 de fabricación estadounidense para realizar los ensayos de carga cíclica.

Para determinar el pico de intensidad de la luz que se utilizaría para determinar las tensiones residuales, primero se analizó una muestra del material base en el difractómetro. Esto permitió saber que el pico de intensidad de la luz a analizar con el ángulo de incidencia igual a 2θ era 106° . Después de conocer el pico a estudiar, se colocó la muestra soldada en el dispositivo de soporte del difractómetro y de esta manera se determinaron las tensiones residuales en la ubicación mostrada en la figura 3. Después de obtener el valor de las tensiones residuales, se desmontó la muestra del difractómetro y se colocó en la máquina de ensayos MTS810 para aplicar un primer bloque de ciclos de carga.

A pesar de que se conocía el valor teórico del límite elástico para el material base, se realizó una prueba de tracción bajo condiciones de control de fuerza en tres probetas soldadas. El propósito de esto fue determinar el límite elástico y el límite de rotura para la unión soldada estudiada.

La carga cíclica se aplicó durante 2 500 ciclos con una carga máxima $P_{max} = 19\,362,6 \text{ N}$ y una carga mínima $P_{min} = 1\,936,26 \text{ N}$. El nivel de carga aplicado fue del 80 % del límite elástico del material, mientras que el coeficiente de asimetría de ciclo R fue 0,1. De acuerdo con estas consideraciones, la carga máxima y mínima a aplicar a la probeta se determinó mediante las ecuaciones (5) y (6), respectivamente.

$$P_{max} = 0,8\sigma_y A \quad (5)$$

$$P_{min} = 0,1P_{max} \quad (6)$$

Donde:

σ_y : límite elástico de las probetas soldadas. Es igual a 322,71 MPa [14].

P_{max} : carga máxima en el ciclo.

P_{min} : carga mínima en el ciclo.

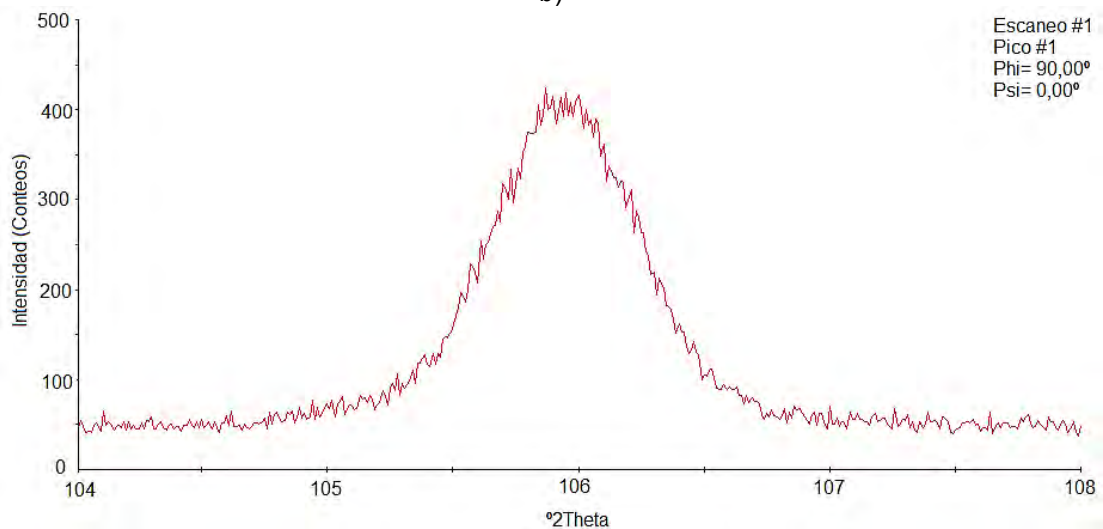
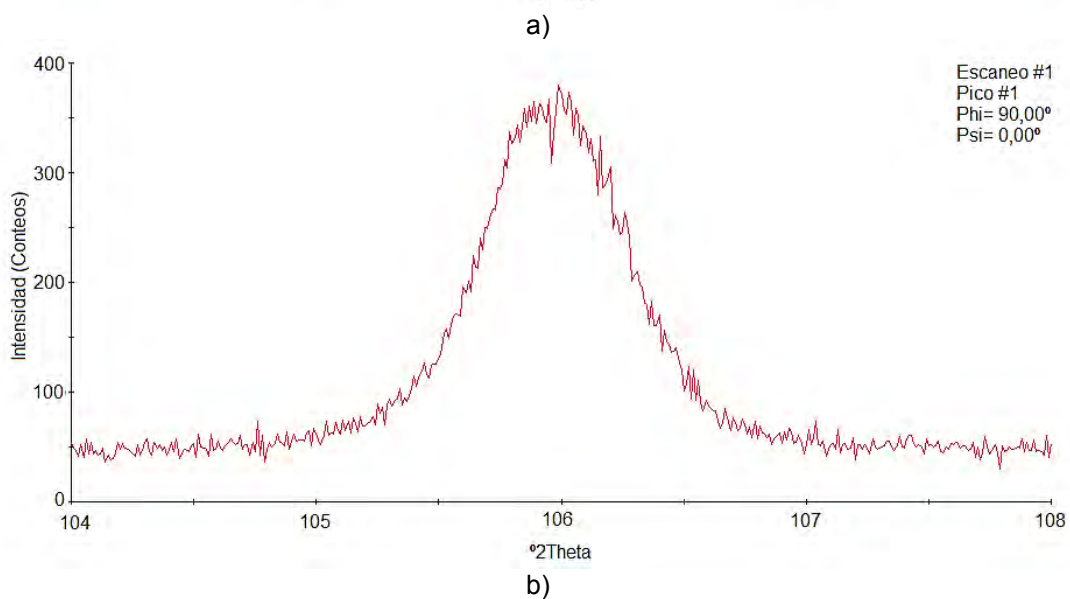
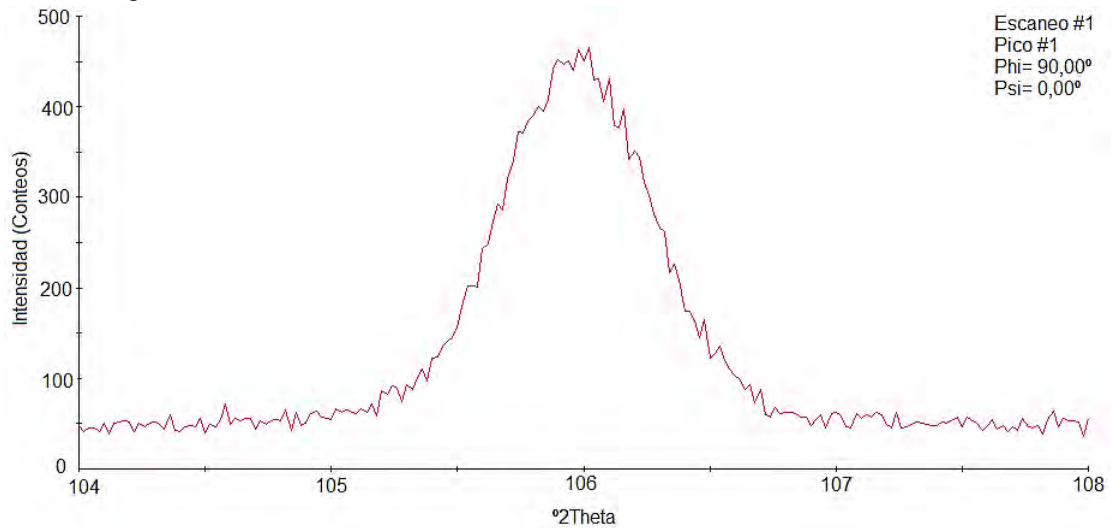
A : área de la sección transversal de las probetas. Es igual a 60 mm², figura 2.

3. Resultados y Discusión

Variación de las tensiones residuales de soldadura bajo la acción de la carga cíclica

A continuación se muestran los resultados de las difractometrías y el cálculo de las tensiones residuales para cada una de las mediciones realizadas.

La figura 4 muestra los difractogramas realizados en cada uno de los ciclos acumulados de carga. En el eje X se ha trazado el ángulo de incidencia 2θ , mientras que el eje Y representa la intensidad. Cabe destacar que hay diferencias en cada uno de los espectros obtenidos, lo que corrobora que las tensiones residuales variaron con la acción de las cargas cíclicas.



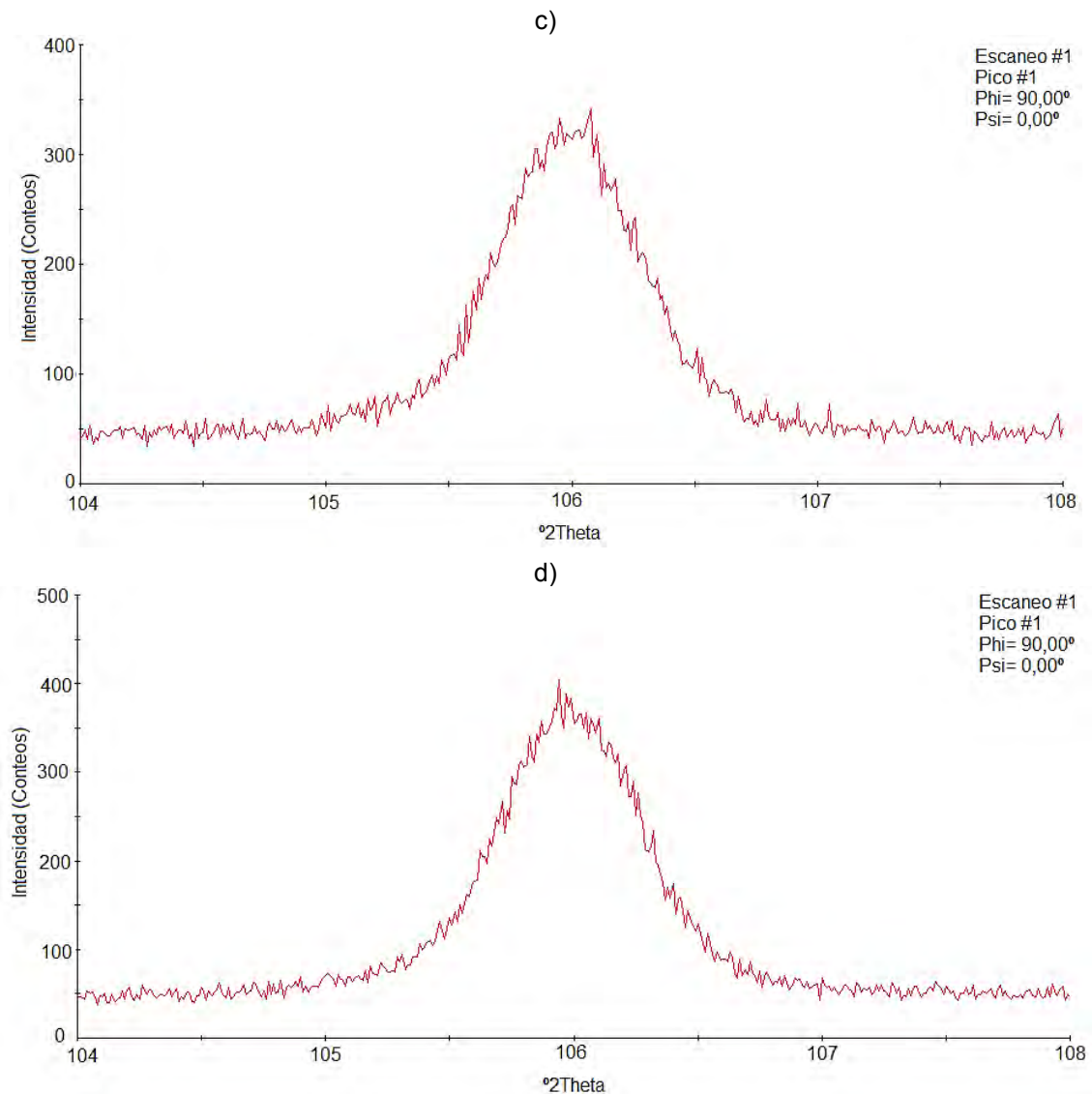
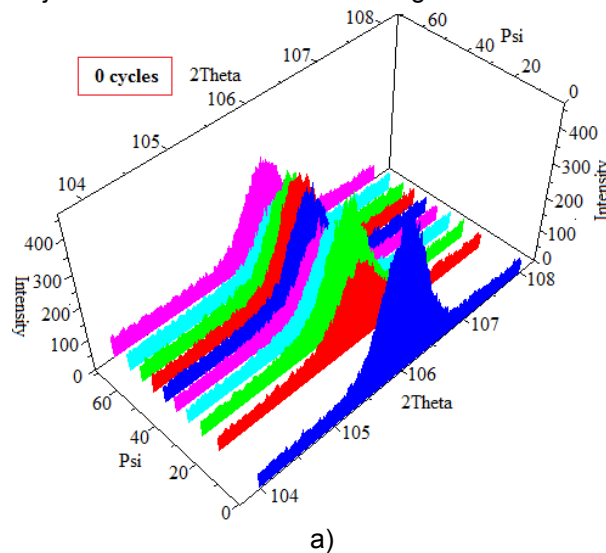
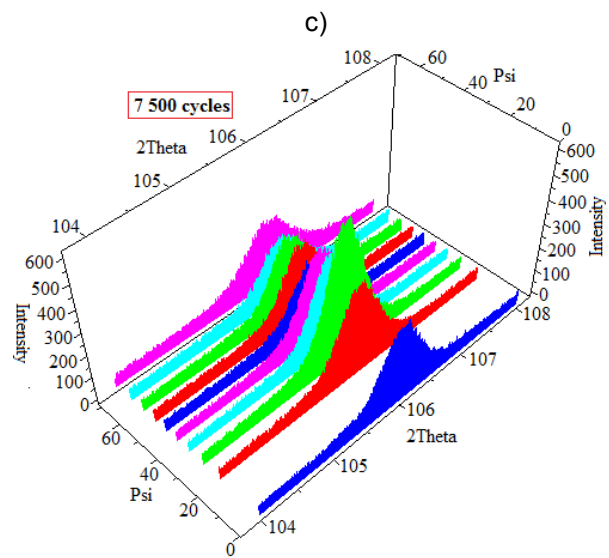
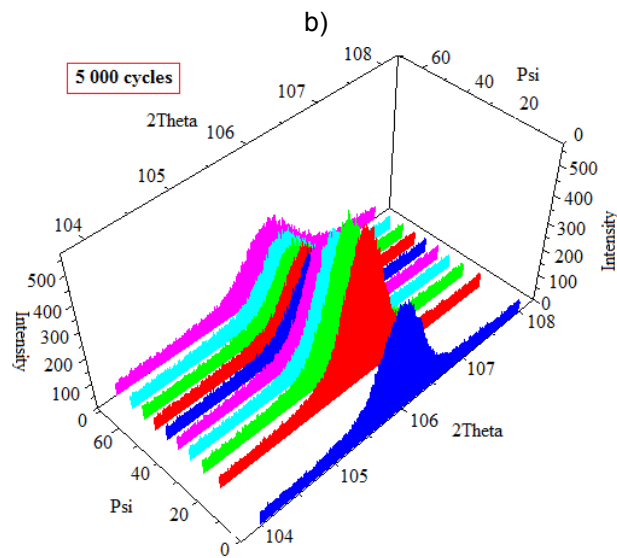
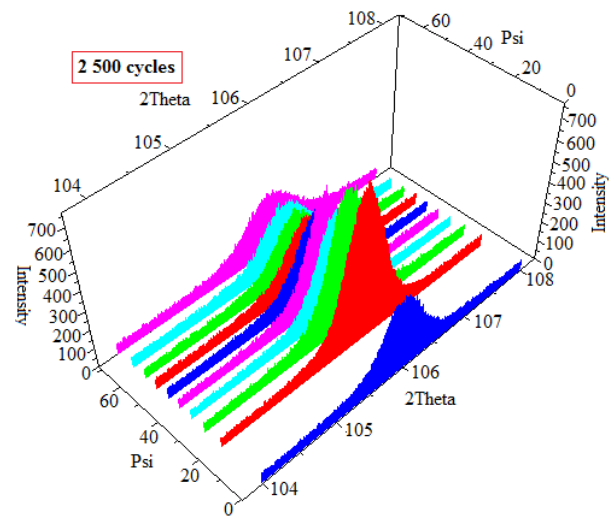


Fig. 4. Difractometrías obtenidas para los diferentes ciclos de carga. a) Antes de comenzar a aplicar la carga cíclica. b) 2500 ciclos. c) 5000 ciclos. d) 7500 ciclos. e) 10000 ciclos. Fuente: autores

En la figura 5 se muestra la forma de los picos en gráficos tridimensionales cuando la probeta se rota en un ángulo ψ en cada medición. Teniendo en cuenta la diferente forma de los picos, después de aplicar un cierto número de ciclos de carga, y también al rotar la muestra en el ángulo ψ , se puede afirmar que las tensiones residuales sufren variaciones bajo la acción de los ciclos de carga.





d)

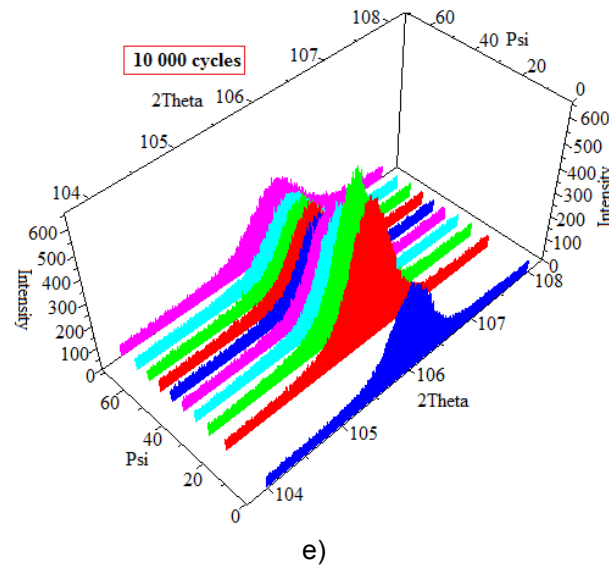
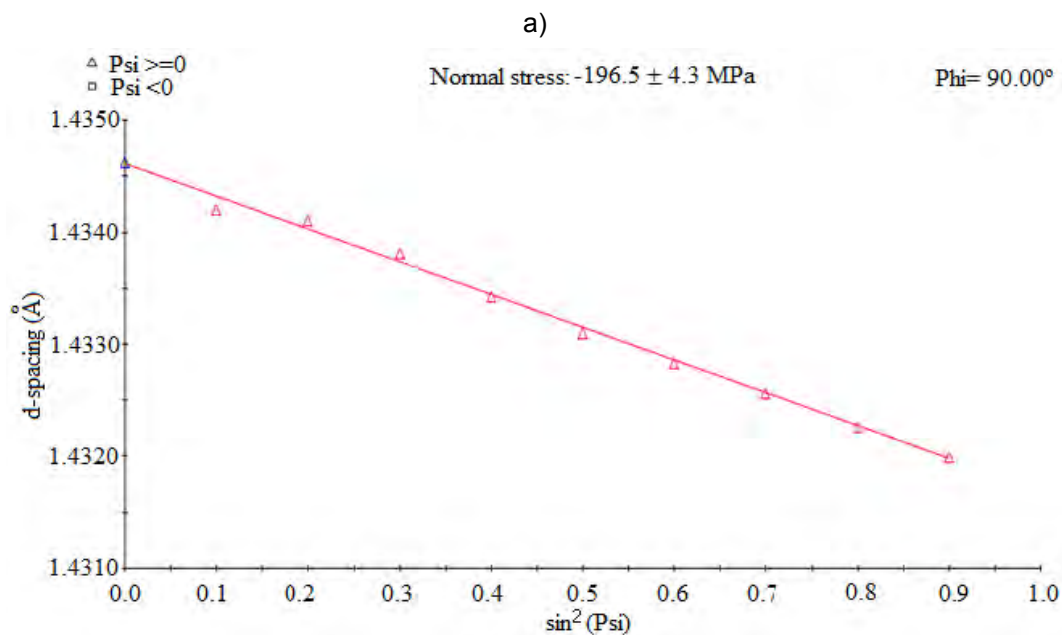
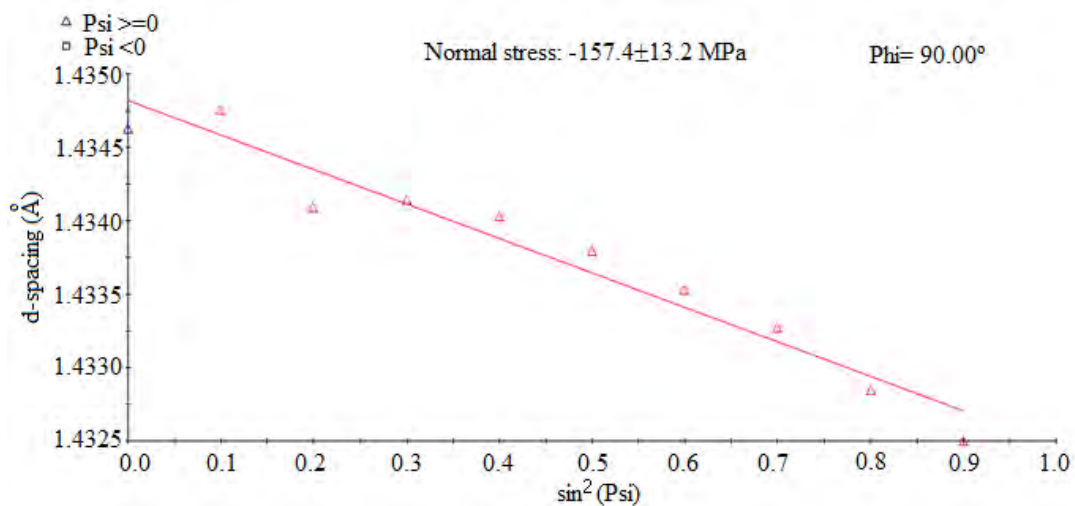


Fig. 5. Gráficos 3D de las difractometrías obtenidas para los diferentes ciclos de carga y la rotación de la probeta un ángulo ψ . a) Antes de comenzar a aplicar la carga cíclica. b) 2500 ciclos. c) 5000 ciclos. d) 7500 ciclos. e) 10000 ciclos. Fuente: autores

A continuación, en la figura 6, se muestran las tensiones residuales calculadas con el software PANalytical X'Pert Stress 2.3. Para ello, se utilizaron los datos mostrados en los gráficos de las figuras 4 y 5.



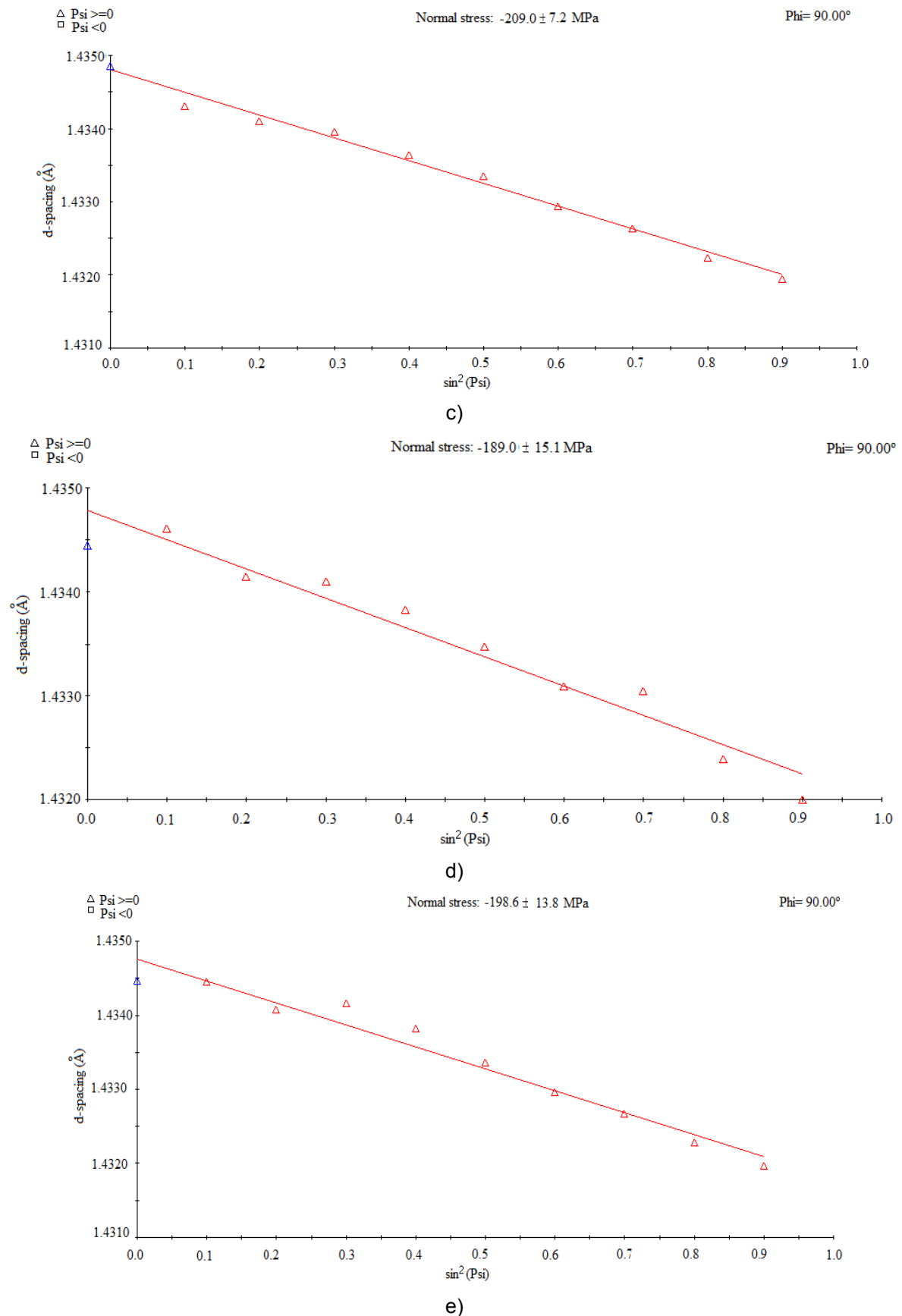


Fig. 6. Tensiones residuales calculadas con las difractometrías. a) Antes de comenzar a aplicar la carga cíclica. b) 2500 ciclos. c) 5000 ciclos. d) 7500 ciclos. e) 10000 ciclos. Fuente: autores

La tabla 1 resume el valor de las tensiones residuales en los diferentes ciclos de carga. Como se puede ver, en la ubicación medida, las tensiones residuales de compresión obtenidas mediante difracción de rayos X tienden a aumentar en valor absoluto. Trabajos anteriores habían encontrado altos valores de tensiones residuales

negativas del orden de -150 MPa [15]. En esa investigación, también se utilizó la técnica de difracción de rayos X para determinar las tensiones residuales.

Tabla 1. Valor de las tensiones residuales con los ciclos de carga. Fuente: autores

Ciclos	Tensiones residuales (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Porcentaje del valor inicial (%)
0	-157,4	±13,2	-
2500	-196,5	±4,3	124,84
5000	-209,0	±7,2	132,78
7500	-189,0	±15,1	120,08
10000	-198,6	±13,8	126,18

En el gráfico que se muestra en la figura 7, se expone la variación de las tensiones residuales con los diferentes ciclos de carga. En él, los ciclos de carga se encuentran a lo largo del eje de abscisas, mientras que las tensiones residuales están ubicadas a lo largo del eje de ordenadas. Cada punto representado es una medición de las tensiones residuales en la posición mostrada en la figura 2. La línea sólida es la tendencia seguida por las tensiones residuales en el tiempo con la acción de las cargas cíclicas y sigue la ecuación (7).

$$\sigma_{res} = -0,003N - 175,12 \text{ (MPa)} \quad (7)$$

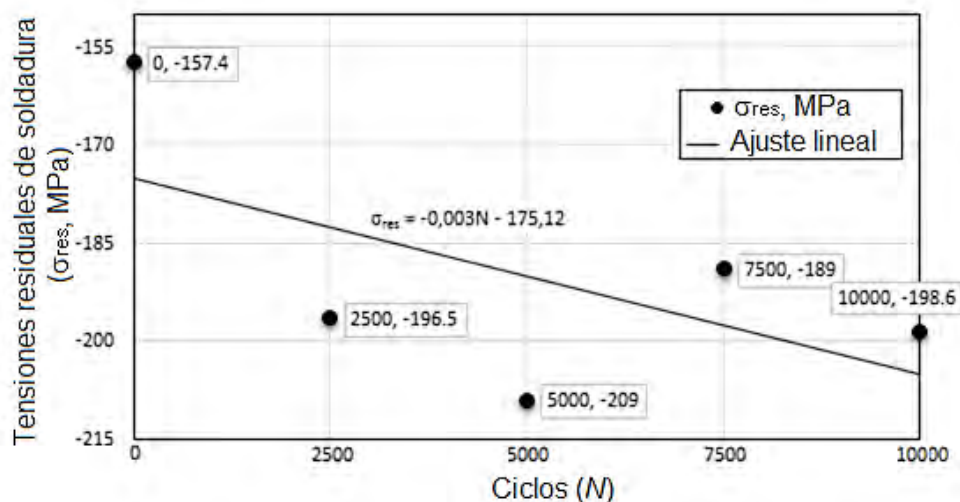


Fig. 7. Relación entre las tensiones residuales de soldadura con la acción de las cargas cíclicas en la posición marcada. Fuente: autores

En la posición indicada en la figura 2, las tensiones residuales están a compresión. Es importante señalar que el valor de estas está por debajo del límite elástico del material estudiado, por lo que no afectarán el correcto funcionamiento de la unión. Por otro lado, estas tensiones negativas tienen un efecto favorable ante la acción de las cargas cíclicas, porque se sumarán algebraicamente con las tensiones producidas por las cargas externas variables en el tiempo, disminuyendo así la tensión máxima del ciclo de carga. Estas tensiones de compresión también promueven el cierre de posibles grietas.

Según [16], la presencia de valores considerables de tensiones residuales de tracción en la punta de la grieta reduce considerablemente la tenacidad a la fractura de tubos soldados en comparación con aquellos sin soldadura. En contraste con esto, en el caso estudiado en este artículo, la tenacidad de la unión no se ve afectada, al menos en el área analizada, precisamente debido a la presencia de tensiones residuales de compresión. Como se explica en [17], la magnitud y distribución de las tensiones residuales dependen, entre otros factores, de la posición de la zona estudiada en el cupón de soldadura.

En [18] estudiaron la relajación de tensiones residuales con la acción de cargas cíclicas. En ese estudio se encontró que el grado de relajación de las tensiones residuales es mayor durante los primeros ciclos de carga y posteriormente tiende a disminuir. Estos autores afirmaron que la relajación es un proceso que ocurre prácticamente durante los primeros ciclos de carga y luego su valor se mantiene casi sin cambios.

En este estudio, se obtuvo un comportamiento similar para las tensiones residuales. Como se muestra en la tabla 1, las tensiones residuales determinadas después de aplicar 2 500 ciclos de carga representan el 124,84

% de las obtenidas con la medición realizada en la unión antes de aplicar las cargas cíclicas. Sin embargo, las mediciones siguientes presentan poca variación con respecto al valor obtenido en 2 500 ciclos de carga.

En este trabajo, se midieron las tensiones residuales a nivel superficial aplicando una técnica no destructiva ya que la pieza estudiada no se ve afectada. Esto permite afirmar que la técnica de medición de tensiones por difracción de rayos X puede ser utilizada como una herramienta para el control de calidad de la unión soldada. La técnica de difracción de rayos X es altamente recomendada para medir las tensiones residuales en estructuras en servicio. Esta efectividad se demostró en [10,19].

Otro aspecto a tener en cuenta es que con la técnica utilizada, no fue posible medir las tensiones residuales en una posición más cercana al cordón de soldadura, ya que el sobrecordón podría influir en la reflexión de los rayos X.

Conclusiones

Con el procedimiento propuesto en el diagrama de bloques mostrado en la figura 3 se determinó una relación entre la variación de las tensiones residuales de soldadura y la acción de las cargas cíclicas en una unión soldada a tope de acero AISI 1015. Se confirmó que las tensiones residuales variaron bruscamente durante los primeros 2 500 ciclos de carga, y posteriormente permanecen prácticamente sin cambios, similar al resultado reportado en la literatura.

Referencias

1. Strantz M, Ganeriwala, RK, Clausen B. Effect of the scanning strategy on the formation of residual stresses in additively manufactured Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*. 2021;45:102003. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102003>
2. Marola S, Bosia S, Veltro A, Fiore G, Manfredi D, Lombardi M, et al. Residual stresses in additively manufactured AISi10Mg: Raman spectroscopy and X-ray diffraction analysis. *Materials and Design*. 2021;202:109550. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109550>
3. Pandey A, Dalal S, Dutta S, Dixit A. Structural characterization of polycrystalline thin films by X-ray diffraction techniques. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2021;32:1341–1368. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04998-w>
4. Lin Y-Y, Park K-S, Hwang J, Cho N-K, Kim DK. Advanced techniques for residual stress measurement and data processing in fatigue crack growth rate tests of FH36 and 9% Ni steel at cryogenic temperatures. *Ocean Engineering*. 2025;316:119942. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119942>
5. Wang L, Qian X. Effects of pre-tension and fatigue loadings on the evolution of welding residual stresses in welded plates. *Engineering Structures*. 2024;301:117272. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117272>
6. Gao Za, Gan J, Liu H, Liu X, Wu W. Fatigue crack growth prediction for shot-peened steel considering residual stress relaxation. *Materials & Design*. 2023;234:112301. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112301>
7. Chen Z, Li D, Li J, Yi J. The influence of welding-induced 3D residual stress and distortion on the ultimate strength of multi-stiffened thin plate structures under cyclic load. *Ocean Engineering*. 2024;311(1):118797. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118797>
8. Chen Z, Wang Q, Nie S, Jing S, Kong B, Luan N. Optimization of fatigue life of the seismic vibrator baseplate considering the coupling effect of welding residual stress. *Alexandria Engineering Journal*. 2025;112:551-568. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.10.094>
9. Tabatabaeian A, Reza Ghasemi A, Shokrieh MM. Residual Stress in Engineering Materials: A Review. *Advanced Engineering Materials*. 2022;24(3): 2100786. <https://doi.org/10.1002/adem.202100786>
10. He Y, Zhou H, Zhao Y, Zhang T, Liu C, Xu L, et al. Investigating the thermal stability of compressive residual stress in a gradient nanostructured austenitic stainless steel by in-situ XRD and TEM. *Materials Characterization*. 2024;207:113610. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113610>
11. Ghosh G, Sidpara A, Bandyopadhyay PP. Experimental and theoretical investigation into surface roughness and residual stress in magnetorheological finishing of OFHC copper. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116899. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116899>
12. Sun RC, Tisone TC, Cruzan PD. Internal stresses and resistivity of low voltage sputtered tungsten films. *J. Appl. Phys.* 1975;44:1009-1016. <https://doi.org/10.1063/1.1662297>
13. Echeverry Garzón RD, Benavides Palacios VJ, Jiménez Forero HA. Efecto de la temperatura de revenido en las propiedades microestructurales, cristalográficas y resistencia al desgaste del acero AISI/SAE 1045: Scientia Et Technica. 2021;26(2):152-158. <https://doi.org/10.22517/23447214.23731>
14. Almaguer Zaldivar PM, Zambrano-Robledo P, Cabral-Miramontes J. Evaluación a tracción de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y alambre ER71-T. In: *Ciencia en la Universidad, de docentes a estudiantes*. Sevilla, España: Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, Punto Rojo Libros; 2023. <https://idus.us.es/bitstreams/93d03eb0-8036-4432-bbcd-f84b2f532df2/download>
15. Smith DJ, Farrahi GH, Zhu WX, McMahon CA. Experimental Measurement and Finite Element Simulation of the Interaction between Residual Stresses and Mechanical Loading. *International Journal of Fatigue*. 2001;23:293-302. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00104-3)
16. Moshayedi H, Sattari-Far I. The effect of welding residual stresses on brittle fracture in an internal surface cracked pipe. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2015;126-127:29-36. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.01.003>
17. Hurlston RG, Sherry AH, James P, Sharples JK. Prediction of retained residual stresses in laboratory fracture mechanics specimens extracted from welded components. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2015;128:48-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.02.002>
18. Jinwoo Ch, Chin-Hyung L. FE analysis of residual stress relaxation in a girth-welded duplex stainless steel pipe under cyclic loading. *International Journal of Fatigue*. 2016;82:462–473. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.09.001>
19. Hayama M, Kikuchi S, Tsukahara M, Misaka Y, Komotori J. Estimation of residual stress relaxation in low alloy steel with different hardness during fatigue by in situ X-ray measurement. *International Journal of Fatigue*. 2024;178:107989. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107989>

Editores:

Alberto Julio Rodríguez Piñeiro, Vladimir T. González Fernández
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores**Pavel-Michel Almaguer-Zaldivar.**

Participó en la búsqueda de información, el diseño de la investigación, en la propuesta del procedimiento, recolección de datos y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Marla Berenice Hernández Hernández.

Participó en el diseño de la investigación, recopilación de datos, procesamiento de los datos experimentales y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Patricia Zambrano.

Participó en la búsqueda de información, diseño de la investigación, fabricación de las probetas y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

José Cabral-Miramontes.

Participó en la realización de los ensayos mecánicos, determinación de los parámetros del ciclo de fatiga, experimentos de fatiga y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Josué Amilcar Aguilar Martínez.

Participó en la realización de experimentos de difracción de rayos X, cálculo de las tensiones residuales, así como en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.