

## EFFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE REPARACIÓN SOBRE LOS ESFUERZOS RESIDUALES EN COMPONENTES DE ACERO API 5L X65 SOLDADOS IN SITU POR EL PROCESO MMAW

<sup>1</sup>Alfonso Ballesteros Hinojosa<sup>a</sup>, <sup>2</sup>Núria Cuadrado Lafoz<sup>b</sup>, <sup>2</sup>José Jorge Ruíz Mondragón<sup>a</sup>, <sup>2</sup>Fernando Macías López<sup>a</sup>, <sup>2</sup>Jorge Leobardo Acevedo Dávila<sup>a</sup>, <sup>2</sup>Eddy Alfaro López<sup>c</sup>.

<sup>a</sup>Corporación Mexicana de Investigación de Materiales; Saltillo, Coahuila. México. <sup>b</sup>Fundació CTM Centre Tecnològic; Manresa, Barcelona, España, <sup>c</sup>San Luis Rassini, Piedras Negras, Coahuila México.

[aballesteros@comimsa.com](mailto:aballesteros@comimsa.com), [nuria.cuadrado@ctm.com.es](mailto:nuria.cuadrado@ctm.com.es), [jjorge.ruiz@comimsa.com](mailto:jjorge.ruiz@comimsa.com),  
[fmacias@comimsa.com](mailto:fmacias@comimsa.com), [jacevedo@comimsa.com](mailto:jacevedo@comimsa.com), [ealfarol@sanluisrassini.com](mailto:ealfarol@sanluisrassini.com)

La expropiación de petróleo en el mundo cada vez se lleva a cabo en aguas más profundas, lo que trae consigo el desarrollo de tecnologías de soldadura para reparación y el uso de nuevos materiales. Sin embargo, al realizar un proceso de reparación por soldadura trae consigo la generación de esfuerzos residuales inherentes del proceso. La magnitud de estos esfuerzos, pueden promover la falla del componente, de ahí la necesidad de cuantificar este tipo de esfuerzos. En la actualidad se tienen diferentes técnicas de medición de los esfuerzos residuales, sin embargo, se tiene poco conocimiento de la diferencia en magnitud que presentan estas técnicas. En este trabajo se contempla verificar la influencia en la generación de esfuerzos residuales al variar la profundidad de reparación, 10 y 15 m realizadas in situ mediante el proceso MMAW en tubería API 5L X65. La estimación de esfuerzos residuales se realizó mediante dos técnicas, nanoindentación y difracción de rayos X. Se encontró que la magnitud de los esfuerzos residuales es mayor en los componentes reparados a mayor profundidad, existen diferencias en magnitud de los esfuerzos residuales dependiendo de la técnica pero cabe mencionar que el comportamiento de los esfuerzos es similar.

Palabras clave: Soldadura submarina, esfuerzos residuales, nanoindentación, difracción de rayos X

### 1 INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura manual por arco (MMAW, por sus siglas en inglés Manual Metal Arc Welding), es uno de los procesos de mayor aplicación en la unión y reparación de tuberías. Sin embargo, la aplicación de soldadura trae consigo cambios microestructurales en los materiales, que pueden afectar directamente sus propiedades mecánicas.

Para el caso de una soldadura húmeda, se ha encontrado<sup>[1]</sup> que a medida que se incrementa la profundidad de reparación o unión se tiene una mayor probabilidad de incurrir en defectos como atrapamiento de gas y problemas de agrietamiento por hidrogeno que sumado a esto se tiene la generacion de esfuerzos residuales, lo que pueden agravar aun más la integridad mecanica de la tubería. Por lo cual, la aplicación de un proceso de soldadura en medios submarinos es solo implementado en reparaciones de tipo provisional, como paso previo a su reparación permanente en seco.

Por lo que, la implementación de mejores controles de calidad que permitan establecer al proceso de soldadura submarina húmeda, como un proceso confiable para uniones permanentes tendrá un impacto directo sobre el costo y el tiempo invertido en este tipo de actividades.

La medición de dureza, ha sido utilizada históricamente para la caracterización y el control de calidad de los materiales<sup>[2-4]</sup>, sin embargo gracias a los avances tecnológicos es posible generar un sistema de indentación instrumentada, el cual, permite el registro y control de las cargas y desplazamientos del indentador<sup>[2, 3, 5]</sup>. Información que permite determinar parámetros mecánicos como; nanodureza, módulo de elasticidad, resistencia a la fractura, esfuerzo a la cedencia, esfuerzos residuales<sup>[4-6, 7]</sup> entre otros. Todo esto a través del análisis de su curva carga-desplazamiento (P-h).

Existen otras técnicas como difracción de rayos X con las cual es posible medir los esfuerzos residuales, el cual, está basado en la medición angular de la distribución de deformaciones en la estructura del material, basados en el cambio de los espaciamentos en la red cristalina y su relación con la ley de Hook, a partir de la distribución de deformaciones.

Este trabajo pretende analizar uniones realizadas *in situ* a 10 y 15 m por medio de indentación instrumentada y difracción de rayos X, a fin de poder verificar si la presión hidrostática tiene un efecto considerable sobre la generación de esfuerzos residuales de los componentes reparados por soldadura MMAW.

## 2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la Figura 1 se ilustra de forma esquemática la geometría de las placas usadas para la unión por MMAW *in situ*. Se cortaron 4 placas con dimensiones de 0.2 X 0.1 X 0.00635 m (largo, ancho y espesor, respectivamente), extraídas de una tubería con costura de

diámetro de 0.3048m (12 pulgadas). En la zona de la junta las muestras fueron biseladas a 45° con unión a tope.

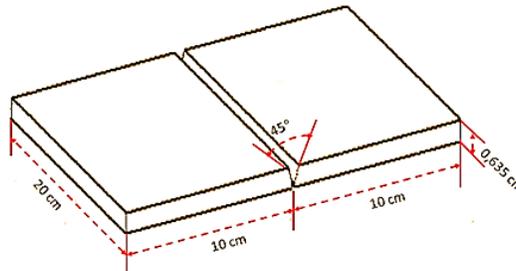


Figura 1 Esquema detallado de las placas a soldar.

Las placas fueron soldadas en el mar a 10 y 15 m de profundidad. Usando los parámetros de operación constantes a fin de no introducir más variables en el sistema, los cuales se enlistan en la Tabla 1. En cada placa de acero fueron colocados dos cordones de soldadura. Empleando electrodos comerciales para uso submarino UW-CS-1 AWS E70XX con un diámetro de 3.2 mm (1/8 in).

A diferencia del resto de los ensayos realizados por otros autores durante la aplicación de los cordones de soldadura sobre las placas, estas no fueron sujetas de los extremos, ya que el espesor de las mismas no representaba un riesgo para distorsionar el material<sup>[8]</sup>.

Tabla 1 Parámetros de probetas de soldadura

Cantidad de Probetas	Profundidad (m)	Amperaje (A)	Velocidad de Avance (m/s)
2	10	190	0.00212-0.0017
2	15	190	0.00212-0.0017

Las muestras soldadas fueron cortadas de forma transversal al cordón de soldadura y preparadas metalográficamente y atacadas con NITAL al 5%. Las dimensiones de la muestra a analizar fueron 4 mm de espesor y 4 cm de largo.

Los ensayos de cada una de las probetas fueron realizadas mediante el equipo de nanoindentación Nano Indenter XP (MTS), compuesto por una unidad de control y una de nanoindentación. Integrado con un modulo CSM, que permite el registro continuo de la rigidez. Usando un indentador Berkovich de diamante de tres puntas. El desplazamiento y la carga fueron monitoreados de forma continua. Las mediciones fueron realizadas en el metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y soldadura.

Realizando un promedio de 30 ensayos a 1500 nm de profundidad por cada probeta. Con una separación, entre cada indentación, de 250000 nm en dirección X.

La Tabla 2 muestra los parámetros utilizados en la generación de cada una de las probetas examinadas mediante el equipo de nanoindentación.

Tabla 2 Parámetros utilizados en cada probeta soldada, en caracterización por nanoindentación

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad	10	nm/s
Taza de deformación	0.05	s <sup>-1</sup>
Frecuencia	45	Hz
Profundidad máxima	1500	Nm
Desplazamiento armónico	2	Nm

Obteniendo las mediciones de esfuerzos residuales a través de la siguiente ecuación reportada por la literatura<sup>[9-11]</sup>,

$$\sigma_{res} = \frac{3(L_0 - L_T)}{2A_C^T} \quad (1)$$

Donde  $L_0$  es la carga aplicada en el material sin esfuerzos,  $L_T$  es la carga aplicada al material en presencia de esfuerzos residuales y  $A_C^T$  es el área de contacto correspondiente, la cual se calcula mediante;  $(L_T * A_C^0)/L_0$

La medición de los esfuerzos residuales también fue realizada mediante Difracción de Rayos X (DRX) con un equipo X XTRESS 3000, el cual, se basa en la medición angular de la distribución de deformaciones en la estructura del material, fundamentándose en la ley de Hook. Las condiciones de prueba se enlistan en la Tabla 3.

Cabe mencionar, que las técnicas usadas en la medición de los esfuerzos residuales, no consideran el valor de la presión hidrostática para el calculo de los esfuerzos, ya que es una variable independiente, la cual, se vera reflejada en el resultado de los mismos.

### 3 RESULTADOS

En La Figura 2 se muestran las macrografías de las soldaduras analizadas para 10 y 15m de profundidad, a y b respectivamente. Se observa que la geometría del cordón de soldadura, se ve ligeramente modificado en función a la profundidad. Se muestra que en ambas piezas se aplicaron dos cordones de soldadura. Su dimensionamiento se enlista en la Tabla 4. Se observa que las dimensiones de las uniones presentan un variación no

significativa excepto para ZAC, la cual, es mayor en un 28% al incrementar la profundidad.

Tabla 3 Parámetros utilizados en cada probeta soldada en caracterización por DRX

Parámetro	Valor	Unidad
Radiación (CrKa)	156.4	Grados
Tamaño de apertura del colimador	1	Mm
Frecuencia de medición	3	Mm
Distancia del colimador	9.75	Mm
Dirección	90	Grados
Voltaje	30	Kv
Corriente	5	mA
Modulo de Young	211000	MPa
Relación de Poisson	0.3	---
Distancia de la superficie	1.3	Mm

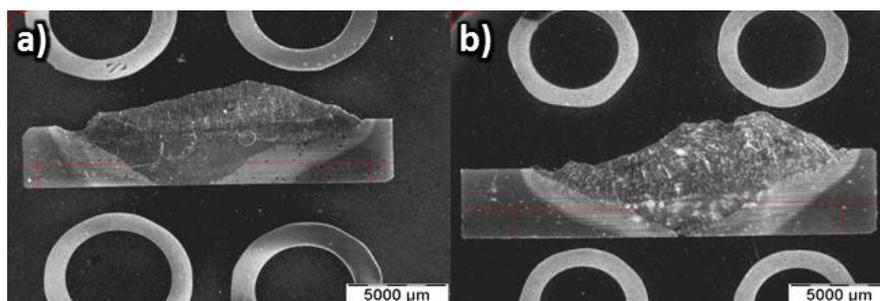


Figura 2 Corte transversal de la soldadura vista a 10X realizada a) 10m y b) 15m de profundidad.

En la Figura 3 se muestra la metalografía obtenida, después de la aplicación del proceso de soldadura MMAW en un acero API 5L-X65, de las tres zonas de la soldadura, para la profundidad de 10m.

El metal base (Figura 3a) esta compuesto de una matriz de ferrita con pequeñas islas de perlita y carburos dispersos de Nb. Microestructura característica de este tipo de aceros estructurales bajo carbono. En la primer zona afectada por el calor (Figura 3b), cercana al metal base, se tiene una matriz de ferrita alotriomórfica, algunas pequeñas zonas con ferrita Widmanstätten, perlita y bainita. En la segunda ZAC (Figura 3c), cercana a la soldadura, se aprecia una mayor proporción de bainita con ferrita Widmanstätten. La soldadura (Figura 3d) presenta una estructura con mayor proporción de ferrita Widmanstätten y bainita, como resultado de la alta velocidad de enfriamiento en esta zona. Cabe hacer mención que los aceros soldados a 10 y 15 m de profundidad presentan el mismo comportamiento microestructural.

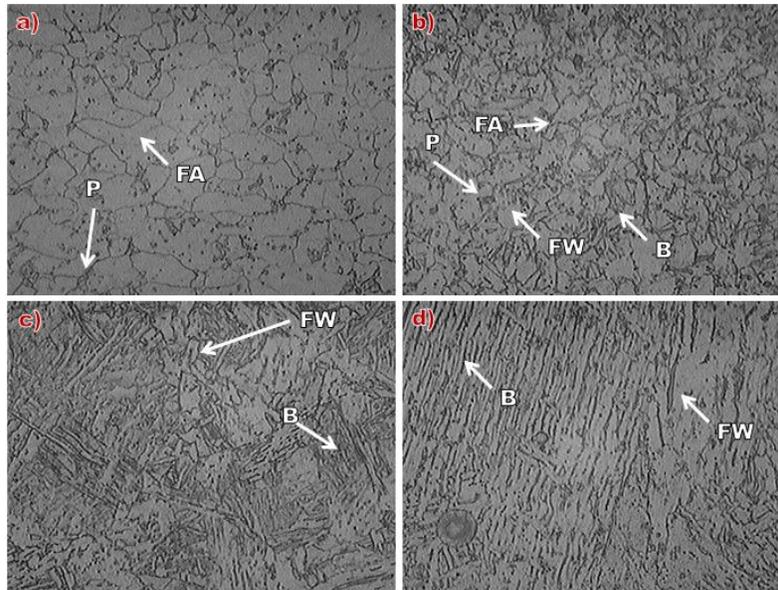


Figura 3 Metalografías las zonas de soldadura a 100X a) Metal base; b) ZAC1; c)ZAC2 y d) Soldadura.

Tabla 4. Dimensionamiento de los cordones de soldadura realizados a 10 y 15m de profundidad.

Parámetro	Profundidad		Unidad
	10 m	15 m	
Refuerzo de soldadura	2.32	2.24	Mm
ZAC	19.06	24.55	mm <sup>2</sup>
Ancho del cordón	14.84	14.89	Mm
Profundidad de penetración	3.39	4.03	Mm

En la Tabla 5 se muestra los valores obtenidos de las fases presentes en las probetas soldadas a 10 y 15 metros de profundidad del mar. Observándose que la proporción de fases es constante independientemente de la profundidad de soldadura. Se muestra que a medida que nos acercamos al cordón de soldadura la bainita aparece como consecuencia de la cercanía a un mayor calor de entrada del arco de soldadura.

Tabla 5. Dimensionamiento de los cordones de soldadura realizados a 10 y 15m de profundidad.

Zona	Fase (%)			Profundidad (m)
	Ferrita	Perlita	Bainita	
Metal Base	83.510	16.490		10
ZAC1	64.030	5.201	30.769	10
ZAC2	59.713		40.287	10
Metal Base	85.735	14.265		15
ZAC1	60.439	6.331	33.23	15
ZAC2	57.402		42.598	15

Al poseer un contenido de carbono por debajo del 0.3 de C en el metal base y en el metal de aporte, no se alcanza a generar martensita en la ZAC y en el metal de soldadura<sup>[12]</sup>.

Por lo que la generación de esfuerzos residuales puede atribuirse en su mayor parte a las deformaciones plásticas no uniformes que ocurren durante la etapa de solidificación del cordón de soldadura. Y en menor proporción a las transformaciones de fase, ya que de las fases presentes, la ferrita Widmstätten y la bainita son las fases que contribuyen en mayor medida en la generación de esfuerzos residuales, por su morfología, actuando como concentrador de esfuerzos, pero en menor proporción comparada con una fase martensítica.

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos para la medición de los esfuerzos residuales por difracción de Rayos X y nano indentación para la probeta soldada a 10 m y en la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para la probeta soldada a 15 m.

En ambos casos se observa que los esfuerzos residuales encontrados para las tres zonas de la soldadura son de compresión.

Los resultados muestran una variación dependiendo de la zona dentro del cordón de soldadura, encontrando un mayor valor de esfuerzos en la ZAC con respecto a las otras zonas, pero siempre de magnitud negativa lo cual indica que estos son de compresión. La magnitud de los esfuerzos encontrados varía con respecto a la técnica, sin embargo, se reproduce el mismo comportamiento dependiendo la zona. La variación de magnitud pudiera asociarse, a que el material de prueba al ser dúctil, por su bajo contenido de carbono, ocasiona que las huellas generadas por el indentador tengan un alto grado de apilamiento y por ende al realizar la medición del área de contacto se dificulte y de cómo resultado una sobrestimación de los esfuerzos residuales calculados.

A diferencia de los esfuerzos encontrados para el acero soldado a 10m, en las probetas soldadas a 15 m se observa que en la ZAC, los valores son más negativos con respecto al resto de los valores, lo cual, sugiere que se tiene la tendencia de aumentar la magnitud de los esfuerzos generados, en esta área, a medida que aumenta la profundidad bajo el mar durante la aplicación de soldadura.

El comportamiento de la distribución de los esfuerzos residuales en la placa soldada, es consecuencia de la contracción y dilatación que experimenta el material durante la aplicación de la soldadura, ya que en un inicio el metal de soldadura tiende a dilatarse, mientras que el metal base adyacente actuara en contra de esto, generándose así esfuerzos de compresión en el metal de soldadura y de tensión en el metal adyacente. Sin

embargo al iniciar la solidificación del metal de soldadura se propicia su contracción y la generación de esfuerzos residuales de tensión en esta zona, además de ocasionar el cambio de esfuerzos de tensión a compresión en el metal adyacente a la soldadura [8].

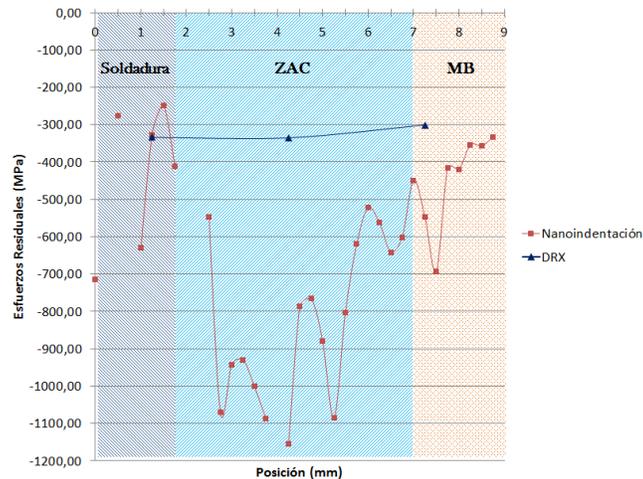


Figura 4. Variación de los esfuerzos residuales con respecto a la posición para la probeta soldada a 10 m de profundidad, por medio de DRX y nanoindentación.

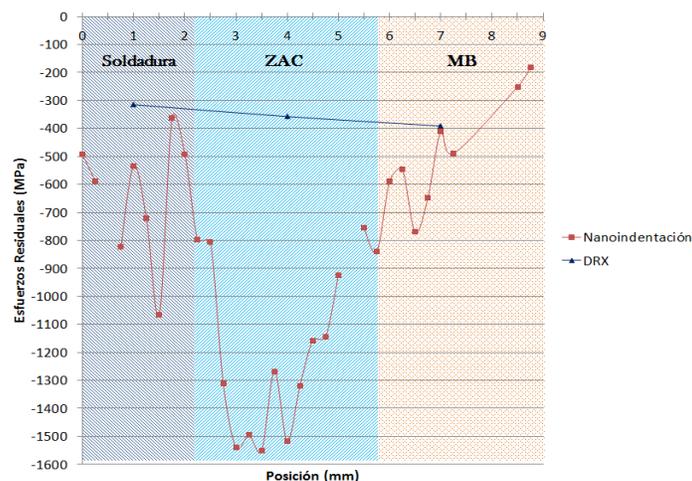


Figura 5. Variación de los esfuerzos residuales con respecto a la posición de la probeta soldada a 15 m de profundidad, por medio de DRX y nanoindentación.

Para el caso de los resultados obtenidos para esta investigación no se observan esfuerzos de tensión en el cordón de soldadura, lo cual se atribuye principalmente a la falta de sujeción de las placas durante la aplicación de la soldadura, dando lugar una mayor relajación de los esfuerzos generados. Sin embargo se observa que existe una tendencia de pasar de esfuerzos de compresión a tensión en la zona del metal de

soldadura ya que en las zonas adyacentes a la soldadura los valores de compresión son menos negativos.

#### **4 CONCLUSIONES**

Con la investigación mostrada previamente podemos decir:

Existe un efecto de la presión hidrostática sobre las soldaduras submarinas al tener un aumento del 28% en la longitud de la ZAC de una soldadura realizada a 15 metros en comparación a una de 10 metros.

El efecto de la presión hidrostática sobre el cambio de fase no es significativo, debido principalmente al bajo contenido de carbono, obteniéndose similitud en el porcentaje y tipo de fases en las tres zonas de la soldadura.

A medida que nos acercamos al cordón de soldadura, se tiene un aumento de bainita y una disminución de ferrita (Widmstätten y Alotriomórfica) sin presencia de perlita, por efecto del calor de entrada del arco de soldadura.

La generación de esfuerzos residuales, en este tipo de aceros, se atribuye a las deformaciones plásticas no uniformes y a la formación de fases como ferrita Widmstätten y bainita.

Ambas técnicas, DRX y nanoindentación, concuerdan con el comportamiento de los esfuerzos residuales en las diferentes zonas de la soldadura, sin embargo existe una variación considerable en la magnitud de los esfuerzos. La sobrestimación de las magnitudes obtenidas por la técnica de nanoindentación, es producto del apilamiento que presenta el material de prueba durante la generación de la huella.

A mayor profundidad la velocidad con que ocurre la contracción del metal de soldadura aumenta, promoviendo la acumulación de una mayor cantidad de esfuerzos en la ZAC.

La ausencia de esfuerzos de tensión en la zona del metal soldado es consecuencia de la falta de sujeción de las placas en el momento de la aplicación de la soldadura. Sin embargo en la interface Soldadura-ZAC se ve la tendencia a obtener valores positivos.

#### **5 REFERENCIAS**

[1] Duffus, A; Queiroz, A; Perdomo, L; Pereira, E; Quintana, R; Rodríguez, M,

- «Caracterización Metalográfica de Depósitos de Soldadura Subacuática Mojada,» 06 Noviembre 2008.
- [2] Oliver, W; Pharr, G, «Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology,» *Mater*, vol. 19, n° 1, pp. 3-20, 2004.
- [3] Oliver, W; Pharr, G, «An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments,» *Materials Research Society*, vol. 7, n° 6, pp. 1564-1583, 1992.
- [4] Huber, N; Heerens, J, «On the Effect of a General Residual Stress State on Indentation and Hardness Testing,» *Acta Materialia*, vol. 56, pp. 6205-6213, 2008.
- [5] J. Jae-il, «Estimation of Residual Stress by instrumented Indentation: A Review,» *Ceramic Processing Research*, vol. 10, n° 3, pp. 391-400, 2009.
- [6] Zhi-Hui, Xu; Xiaodong, Li, «Residual Stress Determination Using Nanoindentation Technique,» de *Micro and Nano Mechanical Testing of Materials and Devices*, 2008, pp. 139-153.
- [7] Sakharova, N; Prates, P; Oliveira, M; Fernandes, J; Antunes, J, «A Simple Method for Estimation of Residual Stresses by Depth-Sensing Indentation,» *Strain*, pp. 1-13, 2011.
- [8] S. Kou, *Welding Metallurgy*, Segunda ed., John Wiley & Sons, 2003.
- [9] Lee, Yun-Hee; Kwon, Dongil; Park, Joon; Jang, Jae-il; Kim, Woo-sik, «Residual Stress Assessment in API X65 Pipeline Welds by Non-destructive Instrumented Indentation,» *Key Engineering Materials*, pp. 35-40, 2004.
- [10] Min-Jea, Choi; Kyung-Woo, Lee; Ju-Young, Kim; Kwang-Ho, Kim; Dongil, Kwon, «Application of Instrumented Indentation Technique to Estimate Strength and Residual Stress,» *Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement*, pp. 35-40, 19-21 November 2007
- [11] Charitidis, A; Dragatogiannis, A; Koumoulos, E; Kartsonakis, A, «Residual stress and deformation mechanism of friction stir welded aluminum alloys by nanoindentation,» *Materials Science and Engineering*, pp. 226-234, 2012.
- [12] Thewlis, G. «Classification and quantification of microstures in steels,» *Materials Science and Technology*, vol. 20, n° 2, pp. 143-160, 2004.

**Autorización y renuncia**

Los autores del presente artículo autorizan a los organizadores del 34 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales para publicar el escrito en el libro electrónico “Memoria del 34 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales”. Los organizadores o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.