

Estructura del acero API 5L GR. 65 soldado con arco eléctrico y electrodo revestido*

António Quizila Ricardo

quizilatrust10@gmail.com

Tomás Fernández Columbié

tfernandez@ismm.edu.cu

Universidad de Moa

Resumen: Se determinaron las estructuras que se generan en la zona del cordón de un acero para tubería API 5L Gr. 65 de 100 mm de diámetro y 7 mm de espesor, soldada con electrodo E 7018 de 4 mm de diámetro. Para el depósito de los cordones la preparación se realizó a tope con bisel de 60°, fueron cortadas muestras para ensayos de dureza, composición química y observación con microscopía óptica, todas ellas fueron encapsuladas con resina ROYAPOX-5050. En el primer cordón las estructuras obtenidas son de ferrita+perlita con grano fino en la zona fundida y la afectada por el calor, no siendo así en la interfase donde los granos son más gruesos, en el segundo se obtienen las mismas estructuras, pero de granos de menor tamaño por la soldadura multipasadas. Se determina que la dureza en el primer cordón es de 238 HV, la cual disminuye en el 2do hasta 217 HV afectada esta propiedad por efecto del calor.

Palabras clave: estructura; API 5L; tubería; zonas del cordón; encapsuladas.

* Recibido: 12 marzo 2021/ Aceptado: 5 julio 2021.

Steel structure API 5L GR. 65 soldier with electric arc and coated electrode

Abstract: The structures generated in the area of the strand of an API 5L Gr. 65 pipe steel of 100 mm in diameter and 7 mm in thickness, welded with an E 7018 electrode of 4 mm in diameter, were determined. For the deposit of the cords, the preparation was carried out at the top with a 60° bevel, samples were cut for hardness tests, chemical composition and observation with light microscopy, all of them were encapsulated with ROYAPOX-5050 resin. In the first cord the structures obtained are made of ferrite + pearlite with fine grain in the molten zone and the one affected by heat, not being the case at the interface where the grains are coarser, in the second the same structures are obtained, but from smaller grains due to multipass welding. It is determined that the hardness in the first cord is 238 HV, which decreases in the 2nd to 217 HV, this property being affected by the effect of heat.

Keywords: structure; API 5L; pipe; cord zones; encapsulated.

Introducción

Los tubos para uso en la industria petrolera son comúnmente catalogados de acuerdo con la API, los empleados para la producción en líneas de transmisión adoptan la clasificación API 5L (*Specification for line pipe steel*) y son designados por su límite elástico mínimo aceptable en libras por pulgada cuadradas (psi). Se evalúan como de alta resistencia mecánica, buena soldabilidad, bajo nivel de inclusiones y un buen acabado superficial (Ordóñez, 2004).

Según Junior, Rocha & Brandi (2013), la norma API 5L especifica los requisitos para dos tipos de productos: PSL1 y PSL2 (*Product Specification Level*) que pueden ser tubos de aceros sin costura o soldados, para utilización en los sistemas de transporte por tuberías en la industria de petróleo y gas. Los grados establecidos en esta norma son: A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80, X90, X100 y X120. Los productos PSL1 pueden ser en los grados de A25 hasta X70 y los PSL2 de B hasta X120 (API, 2013). Las diferencias principales entre los dos tipos de productos API están relacionadas con la composición química y propiedades mecánicas, siendo que la elección de uno o de otro depende del empleo y condiciones de operación del tubo.

Melgarejo, Ramírez & Aperador (2013) han realizado estudios para evaluar la tenacidad a la fractura de la zona afectada por el calor (ZAC) en la costura soldada por el proceso de soldadura por arco metálico protegido (*Shielded Metal Arc Welding*) para tuberías de alta resistencia a bajas temperaturas; concluyen que en la costura soldada de la ZAC se tienen valores muy bajos de tenacidades debido a la anisotropía que presenta esta zona.

Li *et al.* (2010) han indicado que las propiedades térmicas, la conductividad y el calor específico, varían muy poco entre aceros al carbono y varios aceros de baja aleación, de tal manera que la velocidad de enfriamiento no es afectada de manera significativa por estos factores. De otro lado, la geometría de la junta de soldadura, el espesor del metal base, su temperatura y el precalentamiento, mostraron un efecto pronunciado en la velocidad de enfriamiento.

Refieren Pichardo *et al.* (2019) que, en la práctica, la temperatura inicial del metal base para el último pase es, a menudo, mucho más elevada que la del primero, si se permite que el calor se acumule a medida que progresa el proceso de aporte de la

soldadura. Por consiguiente, el último pase en las soldaduras a tope puede enfriar más lentamente que este primero.

Si la velocidad de enfriamiento es lenta se puede producir mayor ductilidad y estructuras metalúrgicas de menor fragilidad en la zona afectada por el calor del metal base. Las propiedades más importantes para la soldabilidad son la ductilidad, la resistencia, la dureza. Estas propiedades son afectadas por factores como la composición química, el tamaño de grano y el espesor de las piezas (Reyes-Carcasés *et al.*, 2018).

Las precauciones necesarias para evitar el agrietamiento en las soldaduras de aceros HSLA, como el acero API 5L Gr. X65, dependen del espesor de la pieza a ser soldada, del carbono equivalente, de los consumibles y del tipo de proceso de soldadura utilizado. De acuerdo con la norma API 5L 2013 (*American Petroleum Institute, API 5L, 2010*), para aplicaciones del acero X65 con espesor de pared de tubería menor que 25,0 mm el valor de carbono equivalente (CEIIW) del metal base debe de ser menor que 0,43 % y el CEPcm menor que 0,25 %.

Las zonas intercríticas y subcríticas de la ZAC pueden tener diferentes grados de fragilidad, dependiendo de la composición química del material base y el calor aportado en la soldadura. La región supercrítica se divide en dos regiones: el de crecimiento de grano y el de refinamiento de grano. El estudio de la zona afectada por el calor, por ser la del material adyacente al baño fundido que sufrió alguna modificación en su microestructura, es importante desde dos puntos de vista, fundamentales (Almaguer-Zaldivar y Estrada-Cingualbres, 2015).

Este trabajo tiene como objetivo determinar la estructura del acero API 5L Gr. 65 empleado en línea de tubería y soldado por proceso de soldadura manual y electrodo revestido.

Desarrollo experimental

Composición química del material

El análisis químico del material (Tabla 1) se realizó en un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Tabla 1. Composición química del material base, % en masa

Grado	C	Mn	Si	S	P	Cr	Fe
API 5L Gr. X65	0,11	1,23	0,23	0,004	0,001	0,188	Bal.

Los valores de los elementos químicos obtenidos y comparados con las normas, se determinó que el acero cumple con los requerimientos de la especificación API 5L. Esta tubería con 0,111 % C, se puede catalogar como un acero hipoeutectoide, endurecido por refinamiento de grano y precipitación.

La tubería seleccionada fue de 100 mm de diámetro y 7 mm de espesor (Figura 1), el electrodo empleado fue el E 7018 de 4 mm de diámetro. Para la soldadura los cupones de tubería fueron biselados en simple V a 60° (Figura 1a), según requerimientos del código ASME B31.4.

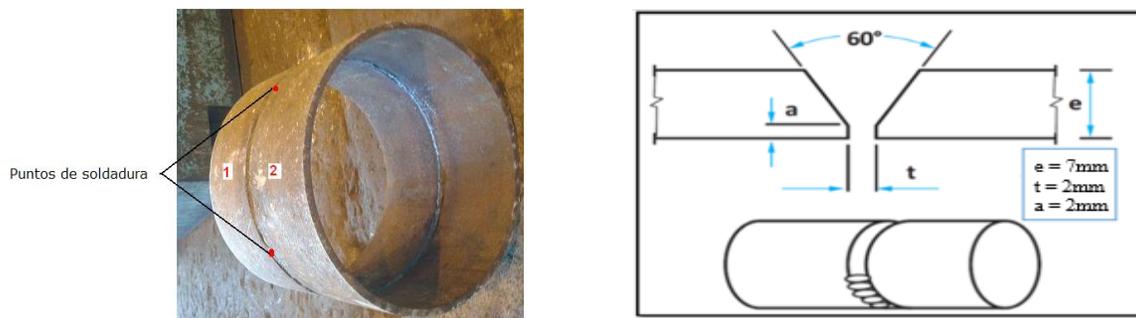


Figura 1. (a) Tubería para la soldadura. (b) Diseño de la junta.

A las tuberías se les realizó cuatro puntos de soldadura a 90°, con el objetivo de evitar distorsiones durante el depósito de los cordones. La progresión fue descendente para lograr penetración en la raíz, poca escoria, buena calidad, mejor uniformidad y un mejor control en la solidificación.

Los parámetros de soldadura empleados se muestran en la Tabla 2, se seleccionaron a partir del tipo y del diámetro del electrodo y las propiedades del material.

Tabla 2. Parámetros para la soldadura

Diámetro del electrodo (mm)	4
Longitud del arco (mm)	3
Temperatura de fusión (°C)	1 539
Temperatura de ignición (°C)	32
Conductividad térmica (W/m·K)	54

Para lograr la unión se consideraron parámetros como la corriente, la tensión y diámetro del electrodo, así como también conocimiento de la curva volt-ampere, la cual indica que al seleccionar una fuente de potencia se debe escoger una en la cual halla intensidad constante para que la pendiente en dicha curva sea mayor y disminuya el cambio en la longitud de arco. Entre menos oscile, se obtendrá una buena calidad en la soldadura.

La operación de corte, como se observa en las Figuras 2, 2a y 2b, se realizó en una fresadora 6M13L, según norma ASTM E 3-95. Con regímenes de corte de 250 r/min y un avance transversal de 25 mm/r, se empleó abundante refrigeración para evitar que, por producto de la fricción entre la fresa y la pieza, existieran posibles transformaciones en la estructura por cambios de fase.



Figura 2. Corte de las muestras.

El corte se ejecutó según los diferentes ensayos a realizar. La Figura 2a se escogió para determinar la dureza, el de la Figura 2b para composición química y el de la 2c para la observación con microscopía óptica.

Luego de cortadas, las muestras se encapsularon, como se muestra en la Figura 3, para realizar las operaciones de desbaste y pulido y garantizar su manejo.



Figura 3. Muestras encapsuladas.

Se realizó el encapsulado, teniendo en cuenta que, cuando se va a realizar análisis microestructural en bordes de muestras deformadas, es importante conservar un ángulo de 90° en toda el área a observar, durante las operaciones de desbaste y pulido, los bordes se distorsionan redondeándose, obteniéndose una falsa observación

de la imagen. El encapsulado se realizó con resina epoxi ROYAPOX-5050. Para atacar las probetas se empleó como reactivo químico el nital al 5 %.

Como en el proceso de soldadura, las zonas que se obtienen son de un margen de pequeños milímetros, se precisó la limitación de cada una de ellas, se midió la dureza en el material base (MB), en la zona afectada por el calor (ZAC) y en la interfase del cordón de soldadura. Se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca echoLAB.

Para la observación microestructural se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100, dotado de una cámara instalada el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe. Las probetas se nivelaron en un dispositivo con plastilina. Para la comparación de las microestructuras obtenidas de la soldadura, se consideró una muestra sin afección del material base. La Figura 4 se corresponde con la muestra patrón.

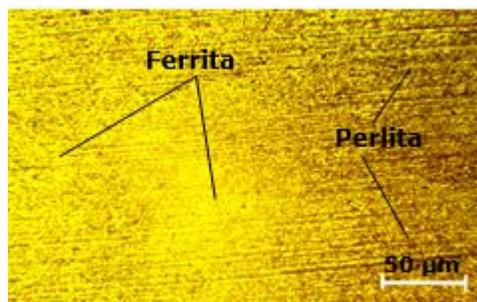


Figura 4. Microestructura del acero API 5L Gr. X65.

Se observa la microestructura del material base, es una estructura laminada (as-rolled) compuesta de granos, aproximadamente, equiaxiales de ferrita (F) proeutectoide (regiones grises) con pequeña cantidad de perlita (P), (regiones negras), microconstituyentes típicos de un acero baja aleación y de bajo contenido de carbono (0,18 % máximo). El objetivo fue obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que permitiera determinar, luego de la soldadura, los cambios ocurridos en la zona afectada por el calor (ZAC), en la zona fundida (ZF) y la interfase.

Resultados y discusión

Comportamiento macrográfico de la unión

Según el procedimiento WPS 001-1, luego de realizado el proceso, se realizó una inspección visual a la unión soldada entre ambas tuberías, como se muestra la Figura 5, para la determinación de la existencia de posibles discontinuidades como socavados, falta de fusión, falta de penetración y grietas que invalidaran el cordón de soldadura.



Figura 5. Análisis macrográfico del cordón de soldadura.

Al realizar la inspección visual a la unión en el área soldada de la línea de tubería se pudo determinar que no existe la presencia de discontinuidades que invaliden la junta soldada, pero si una imperfección al finalizar el cordón denominada mordedura (círculo rojo), la cual es originada por una detención del electrodo al concluir la unión, sin embargo, este no afecta la calidad de la unión.

Análisis microestructural para el 1er cordón

El examen microestructural de la ZAC del metal base de las juntas muestran distintas regiones que varían notablemente debido al ciclo térmico local experimentado durante la soldadura. Se analizaron las microestructuras de las diferentes zonas obtenidas para el depósito del primer cordón. En la Figura 6 se muestran los resultados.

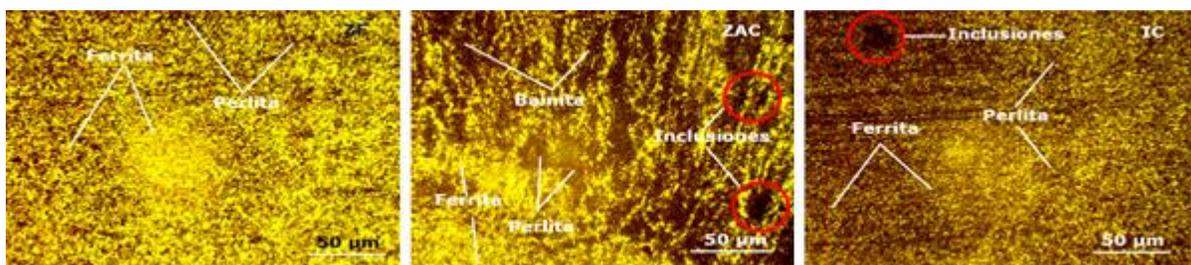


Figura 6. (a) Zona fundida, (b) Zona afectada por el calor, (c) Interfase del cordón.

En la zona fundida (Figura 6a), para el primer cordón del pase de raíz, se observa que en la unión soldada la estructura del metal depositado presenta granos finos, con perlitas en una matriz ferrítica equiaxial y ferrítica de granos gruesos. El mecanismo para este crecimiento se basa en la movilidad de la austenita hacia los granos de ferrita que le rodean. Esta estructura va disminuyendo de grosor hasta desaparecer en la zona adyacente al cordón, esto se debe al calor generado en el proceso de soldadura.

La ZAC (Figura 6b) está compuesta por perlita de grano fino (área oscura) en una matriz ferrítica (área clara), la formación de estas fases son producto de la descomposición de la austenita, donde la ferrita nuclea en los límites de grano, cuando la temperatura empieza a decaer por debajo de la crítica A3, conforme disminuye el carbono se disuelve en la austenita restante transformándola en perlita por debajo de la crítica A1.

En la interfase del cordón se ha obtenido un tamaño de grano grueso recristalizado, provocado por un aumento de la temperatura mayor a la A3. Aquí la distribución de los granos de la ferrita y la perlita no es uniforme debido a la alta tasa de calor aportado a la junta durante el soldeo lo cual impide una rápida difusión del carbono y un crecimiento lento de granos de austenita. Adyacente a esta primera zona se da otra de grano fino, más parecido al grano que ha sido normalizado. Esta zona de grano fino se crea entre las temperaturas A1 y A3 en donde están presentes ferrita + austenita, esta última, durante el enfriamiento se descompone en granos finos de ferrita + perlita (Lambert *et al.*, 2004 y Chilque *et al.*, 2014).

Análisis microestructural para el 2do cordón

En la soldadura multipasadas, estas actúan sobre las estructuras de las zonas de transformación del metal base, en una sucesión de capas alternadas de zonas afectadas y zonas parcialmente normalizadas, distribuidas en un volumen muy reducido, entremezcladas debido a la superposición de varios tratamientos térmicos. En la Figura 7 se muestran las zonas obtenidas en el depósito del 2do cordón. La 7a, se corresponde con la zona fundida, la 7b, la zona afectada por el calor y la 7c, la interfase del cordón.

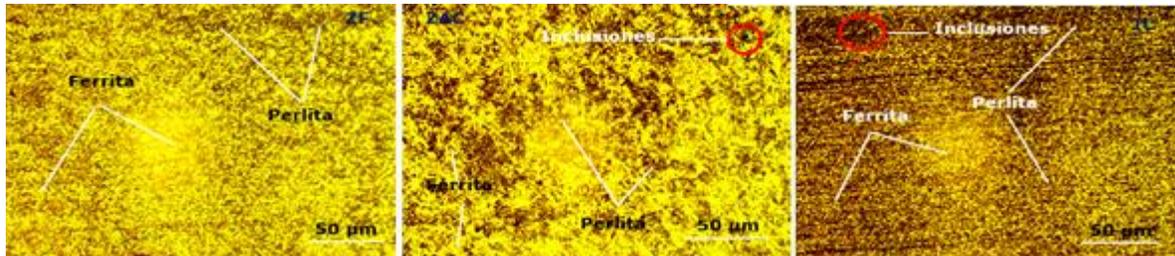


Figura 7. (a) Zona fundida, (b) Zona afectada por el calor, (c) Interfase del cordón.

En la zona fundida (Figura 7a) se observa la formación de ferrita y perlita, con ferrita, formando una red alrededor y en los límites de grano de la perlita y ferrita que ingresan desde el límite de grano hacia el interior de la perlita; estas características son casi constantes en el metal de aporte a lo largo del cordón. El tamaño de grano es consecuencia de las multipasadas realizada, lo cual provoca un recalentamiento sobre los cordones ya depositados y constituye un normalizado que recrystaliza el grano del cordón.

El metal de soldadura y la zona afectada por el calor (Figura 7b) llegan a ser más complejos durante la soldadura de pases múltiples, ya que una porción es recalentada por el ciclo térmico posterior e incluso por los ciclos subsiguientes. A medida que se va creando la ZAC por recalentamiento, las propiedades mecánicas totales del metal se consideran sean determinadas por la combinación de las propiedades de todas las subzonas, según el criterio de Abedi (2017).

En la interfase del cordón (Figura 7c), la estructura es de ferrita+perlita, de menor tamaño de granos. En esta zona, la transformación de las regiones perlíticas a austenita en la etapa intercrítica se realiza por nucleación de la austenita en las uniones entre las placas de cementita y las placas de ferrita, según González-Cabrera *et al.* (2017).

Análisis de la dureza

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de dureza realizados en cada una de las zonas de estudio. Se realizaron tres barridos, el primero hacia la superficie exterior, el segundo en el centro y el tercero hacia la superficie interior del espesor del tubo.

Tabla 3. Resultados de las durezas obtenidas en las zonas consideradas

D	ZAC ₁	ZAC ₂	Interfase ₁	Interfase ₂	ZF1	ZF ₂
0,0	205	200				
0,25	205	203				
0,5	212	206				
0,75	215	210				
1,0			217	213		
1,25			221	217		
1,5			227	222		
1,75					233	214
2,0					235	215
2,25					238	217
-2,0					236	215
-1,75					233	214
-1,5			226	223		
-1,25			221	217		
-1,0			216	213		
-0,75	215	210				
-0,5	213	206				
-0,25	205	203				
0,0	206	200				

Se observa que el primer cordón de relleno presenta una mayor dureza debido a la estructura formada, mayoritariamente constituida de ferrita+perlita y estructura bainítica. Los posteriores a este, presentan una menor dureza, ya que se ven afectados por el calor generado durante la ejecución de los pases siguientes. La zona afectada por el calor cercano a la raíz del cordón, es la que presenta menor dureza, motivado a que la zona es afectada por el calor generado por el pase de raíz y los pases de relleno, creando una condición que simula a un recocido.

Con el aumento de las velocidades de enfriamiento el valor de dureza incrementa. Resultados coherentes con los presentados por Santos (2013), esto está motivado porque, al aumentar la velocidad de enfriamiento de la austenita, no habrá tiempo suficiente para una completa movilidad atómica y las reacciones de transformación de fases son modificadas y, por lo tanto, las propiedades mecánicas también, según lo reportado por Da Costa, Silva & Mei (2010).

Para aceros de alta resistencia y baja aleación, como es el caso del acero API 5L Gr. X65, una dureza mayor que 350 HV (dureza Vickers) puede ser considerada excesiva y llevar a la fragilización y sensibilidad a la fisuración en esta zona, según Modenesi, Marques & Santos (2012).

Conclusiones

Al soldar el acero API 5L Gr. 65 por arco eléctrico y electrodo revestido E 7018, en el primer cordón se obtienen estructuras ferrita+perlita de grano fino en la zona fundida y la afectada por el calor, no siendo así en la interfase donde los granos son más gruesos.

Las estructuras del segundo cordón están compuestas por ferrita+perlita en las tres zonas, pero con un tamaño de granos menor, asociado a la soldadura multipasadas, lo cual provoca un recalentamiento sobre los cordones ya depositados.

En los perfiles de dureza realizados, en el segundo cordón, esta propiedad disminuye con respecto al primero desde 238 HV hasta 217 HV; estos se ven afectados por el calor generado durante la ejecución de los pases posteriores, considerándose que con el valor obtenido no exista la posibilidad de fragilización o fisuración en la soldadura.

Referencias bibliográficas

- ABEDI, S. 2017. Failure investigation of a defective weldment of an oil product transmission pipeline. *J. Fail. Anal. Prev.* 17(1): 30-37.
- ALMAGUER-ZALDIVAR, P. & ESTRADA-CINGUALBRES, R. 2015. Evaluación del comportamiento a fatiga de una unión soldada a tope de acero AISI 1015. *Ingeniería Mecánica* 18 (1): 31-41.
- API 1104 EDICIÓN 2010. Welding of Pipelines and Related Facilities, Pipeline Segment, American Petroleum Institute, Reaffirmed April (2010). API Publishing Services, Washington, D.C.
- CHILQUE, A.; JARDIM, M.; GONÇALVES, P. & TAVARES, S. 2014. Determinação da resistência ao impacto da região de grão grosseiro da ZTA do aço API5L X80 soldado em condições de alta energia. Congr. Nac. Soldag.
- DA COSTA, A.; SILVA, L. & MEI, P. 2010. *Aços e ligas especiais*. 3rd ed. Blucher, São Paulo.
- SANTOS, I. M. D. C. 2013. *Elaboração de um diagrama TAC para um aço de alta tenacidade API X-70*. Doctoral dissertation. Universidade Nova de Lisboa.

- GONZÁLEZ-CABRERA, O.; GÓMEZ-PÉREZ, C.; PERDOMO-GONZÁLEZ, L. & VÁZQUEZ-BADILLO, E. 2017. Comportamiento de la resistencia al desgaste entre depósitos obtenidos con electrodos simple y doblemente recubiertos. *Soldagem & Inspeção* 22(1): 87-98.
- JUNIOR, J.; ROCHA, D. & BRANDI, S. 2013. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. *Soldagem e Inspeção, São Paulo* 25(12): 176-195.
- LAMBERT, A.; DRILLET, J.; GOURGUES, A.; STUREL, T. & PINEAU, H. 2004. Austenite to bainite phase transformations in the heat-affected zone of a high strength low alloy steel. *Acta Materialia* 52(6): 2337-2348.
- LI, C.; WANG, Y.; HAN, T.; HAN, B. & LI, L. 2010. Microstructure and toughness of coarse grain heat-affected zone of domestic X70 pipeline steel during in-service welding. *J. Mater. Sci.* 46(3): 727-733.
- MELGAREJO, M.; RAMÍREZ, C. & APERADOR, W. 2013. Determinación de las causas de falla en la ZAC de un Acero ASTM A36 soldado por proceso SMAW. *Revista Inge CuC* 9(2): 75-82.
- MODENESI, P.; MARQUES, P. & SANTOS, D. 2012. *Introdução à Metalurgia da Soldagem*. UFMG, Belo Horizonte, p. 209.
- ORDÓÑEZ, R. 2004. Soldagem e caracterização das propriedades mecânicas de dutos de aço API 5L-X80 com diferentes arames tubulares. UNICAMP.
- PICHARDO, B.; LÓPEZ, V.; HERNÁNDEZ, R. & SALAZAR, M. 2019. Microestructura y propiedades mecánicas de una junta soldada de placas bicapa API X60/316L. *Ava Cient.* VII(2): 135-145.
- REYES-CARCASÉS, D.; FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; ALCÁNTARA-BORGES, D. & RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I. 2018. Soldadura con los electrodos revestidos E 6010 y E 7018 en acero AISI 1025. *Minería y Geología* 34(1): 108-121.