

Influencia de la temperatura en la soldadura de unión disímil mediante proceso de gas y tungsteno

Influence of temperature on dissimilar joint welding by gas and tungsten process

Tomás Fernández Columbié^{1*}, Ledemis Suárez Torres, Isnel Rodríguez González¹

¹ Departamento de Mecánica, Facultad de Metalurgia Electromecánica, Universidad de Moa. Cuba

Resumen En este artículo se hace una caracterización microestructural de las transformaciones que ocurren en una soldadura disímil, mediante el proceso de soldadura de gas y tungsteno, entre la aleación de tantalio B 521 y el acero inoxidable AISI 316. La costura se realizó a tope, en tuberías de 1,3 milímetros de espesor, con electrodo no consumible de tungsteno al 2 % de torio (WT20). Los parámetros del ciclo térmico considerados fueron la velocidad de soldadura, la energía lineal y entrante del proceso. En esta unión, por efecto de la transferencia de calor, se generó estructura del tipo columnas tosca, estructuras dendríticas, así como una estructura de una red de células hexagonales y ferrita- δ . En el barrido de dureza se determinó un incremento en la zona afectada por el calor de 200 HV en el primero (Tantalio) y de 285 HV para el segundo (acero inoxidable), con un valor de 525 HV en la zona fundida.

Palabras clave Disímil, microestructura, tantalio, torio, tungsteno.

Abstract This article makes a microstructural characterization of the transformations that occur in a dissimilar weld, by means of a gas and tungsten welding process, between the B 521 tantalum alloy and the AISI 316 stainless steel. The seam was made butt, in pipes 1.3 millimeters thick, with a non-consumable 2% thorium tungsten electrode (WT20). The parameters of the thermal cycle considered were the welding speed, the linear and incoming energy of the process. In this union, due to the effect of heat transfer, a coarse columnar type of structure, dendritic structures, as well as a structure of a network of hexagonal cells and δ -ferrite were generated. In the hardness sweep, an increase of the same in the zone affected by the heat of 200 HV was determined in the first (Tantalum) and of 285 HV for the second (stainless steel), with a value of 525 HV in the molten zone.

Keywords Dissimilar, microstructure, tantalum, thorium, tungsten.

* Corresponding author: tfernandez@ismm.edu.cu

1. Introducción

El artículo trata sobre la influencia que tiene el calor sobre la microestructura, en las diferentes zonas de una unión soldadura disimilar, entre dos materiales (tantalio B 521 y acero AISI 316), cuando se realiza mediante el proceso de gas y tungsteno.

El aporte de calor, en los procesos de soldadura, es una medida relativa de la energía transferida a las piezas para ser soldadas. Es necesario considerar la energía debido a que esta afecta la velocidad de enfriamiento y se modifica la estructura final, tanto en la zona de fusión (ZF) como en la zona afectada por el calor (ZAC) [1].

El proceso de soldadura GTAW [2], conocido como TIG, dentro de su utilización se destaca que es muy empleado para uniones de planchas delgadas. Este proceso puede realizarse de dos formas, la primera, utilizando material de aporte y la otra sin la utilización de este. Se reconoce que en la actualidad el

proceso GTAW más utilizado es el que emplea material de aporte; sin embargo, cuando el material que se desea soldar cumple con las propiedades mecánicas requeridas, resulta de gran utilidad aquella que no necesita material de aporte, debido a las ventajas económicas que se reporta.

En la soldadura de arco con gas y tungsteno (GTAW), se procede en general con depósitos sucesivos de metal fundido de volumen muy pequeño con solidificación casi instantánea. Como consecuencia, la estructura del metal fundido es más fina, alineada y acicular. Si la operación lleva varias pasadas, la influencia térmica de estas producirá un refinamiento de grano en las estructuras [2].

1.1 Características de los materiales refractarios

Los metales refractarios [2], presentan altos puntos de fusión, densidad relativamente alta, así como la conductividad térmica. Están considerados en la categoría de difícil

soldadura, debido a que tienen una gran afinidad con el oxígeno, otros gases a temperaturas elevadas y que no pueden soldarse con cualquier proceso o donde el metal calentado se expone a la atmósfera. Deben poseer las menores cantidades de impurezas, que son las causantes que estos metales sean quebradizos.

El tantalio es un elemento refractario, que debe soldarse cuando el aire no se encuentre en contacto con el material soldado. Antes de proceder con la soldadura hay que realizar el proceso de limpieza en la superficie con reactivos químicos, luego se eliminan con agua todos los vestigios de productos químicos. Después que las partes se limpian, deben protegerse de la oxidación; para ello, se emplea una cámara de gas inerte o en una cámara de vacío [3] y [4].

Durante el proceso de soldadura del tantalio [5], puede o no emplearse material de aporte. Sin embargo, es recomendable, para obtener buenos resultados, emplear corriente continua y polaridad invertida al soldar. La ignición del arco debe realizarse con alta frecuencia y emplear como gas inerte el helio, para mantener la máxima penetración.

La soldadura del tantalio, al ser calentado por encima de los 500°C, tiende a oxidarse rápidamente [6] y [7]. Adicionalmente, esta soldadura está propensa a disolver discretamente cantidades de óxido en solución a elevadas temperaturas. La soldadura del tantalio requiere de una atmósfera protectora, como la atmósfera de un gas inerte o activo, para prevenir la contaminación y la fragilidad causada por el nitrógeno y el oxígeno. El relativo bajo coeficiente de expansión térmica y de conductibilidad, minimiza la posibilidad de distorsión, durante la soldadura.

1.2 Particularidades de los aceros inoxidables

El mayor inconveniente que presenta la soldadura de los aceros austeníticos es la precipitación de carburos que puede producirse en las zonas cercanas al cordón de soldadura, quedando sensibilizados a la corrosión intergranular. Para evitar esta precipitación, se deben soldar las piezas sin precalentamiento y con el menor aporte de calor posible. Otra posibilidad es emplear aceros austeníticos con porcentaje de carbono menor a 0,03 % o aceros austeníticos estabilizados con titanio, niobio o tantalio [8].

Desde el punto de vista de la soldadura, los mejores resultados se obtienen cuando la secuencia de solidificación comienza con la fase ferrítica y luego la transformación de austenita al estado sólido [2]. Otro autor [9] plantea que estos aceros se caracterizan, principalmente, por la presencia de cromo para lograr las cualidades de inoxidables, que, al incrementar el contenido, lo hará su resistencia.

Es práctica generalizada en la soldadura, el mantener la temperatura del material base y la ZAC lo más baja posible. Se logra usando bajas intensidades de corriente (compatibles con

una adecuada penetración y fusión), arco corto, cordones cortos o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón [10] y [11]. Es común limitar la temperatura a valores donde el material alcance una temperatura de 70 °C.

El objetivo de este trabajo es determinar la influencia que tiene la transferencia de calor en el comportamiento microestructural de una unión soldada, a tope, entre la aleación de tantalio B 521 y el acero AISI 316, mediante proceso de gas y tungsteno.

1.3 Composición química de las aleaciones

En la tabla 1, se muestra la composición química de la aleación de tantalio B 521 (especificación estándar para tubos de tantalio). Esta aleación se caracteriza por su alta pureza, es un material dúctil y presenta un comportamiento mecánico muy sensible a la temperatura y a la tensión; aun así, se usa para la fabricación de piezas de aviones, reactores y elementos de hornos.

Tabla 1. Composición química de la aleación de tantalio B 521, % en masa

Grado	Fe	Si	Nb	W	Ti
B 521	0,003	0,003	0,028	0,004	0,002
	O	Cr	H	N	TA
	0,010	0,0005	0,001	0,002	Resto

Fuente: Alloy Casting Institute (ACI).

La tabla 2, refleja la composición química del acero inoxidable AISI 316. El níquel y en menor medida el manganeso, se adiciona a este acero para estabilizar la fase austenítica, en un amplio rango de temperatura y, evitar la transformación martensítica cuando son enfriados rápidamente a temperatura ambiente, lo que lo convierte en uno de los materiales de más amplia utilidad en la fabricación de piezas.

Tabla 2. Composición química estándar del acero AISI 316, % en masa

Tipo	C	Si	Cr	Ni
316	0,05	0,34	16,22	10,27
	Cu	Mn	Mo	
	0,29	1,60	2,12	

Fuente: AISI-SAE.

2. Materiales y métodos

En esta sección se expone el diseño de la experimentación realizada y la secuencia para la obtención de los resultados, los pasos, así como los materiales y métodos empleados en el desarrollo de la investigación.

2.1 Plan experimental

Se prepararon tres probetas, de ambas aleaciones con espesor de 1,3 mm. En la figura 1, se observa la vista lateral de probetas para ejecutar la unión soldada. Se realizó a tope sin

preparación de los bordes, con electrodo desnudo y proceso de gas y tungsteno (GTAW) sin el empleo cámara de rastreo.

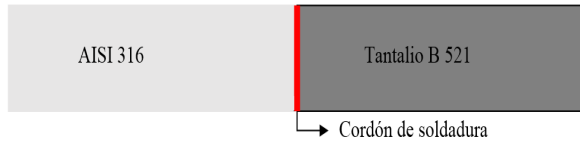


Figura 1. Preparación de la unión para la soldadura.

En la tabla 3, se muestran los parámetros empleados en el ciclo térmico.

Tabla 3. Parámetros para la soldadura de las probetas

Diámetro del electrodo (mm)	2,4
Longitud del arco (mm)	2
Temperatura de fusión (°C)	3 017
Temperatura de ignición (°C)	34
Rendimiento (%)	0,90
Conductividad térmica (W/m·K)	57,5

La unión se preparó con longitud de tubo de 150 mm. Para ello, se depositaron cuatro puntos en el área de la unión (90°), para evitar alabeo y distorsiones. La soldadura se realizó con alambre de diámetro 2,4 mm del tipo ER 316 L Si, el que posee la siguiente composición química: C-0,02%; Si-0,85%; Mn-1,75%; Cr-19%; Ni-12%; Mo-2,7%, según AWS-A-5.9. El electrodo no consumible fue de tungsteno al 2 % de torio (WT20).

La preparación de las muestras se realizó según la Norma ASTM E-92. Luego de soldada, se cortaron con una sierra manual y se encapsularon para determinar el comportamiento en la ZF, la ZAC y la interfase del cordón.

2.2 Microestructura patrón de las aleaciones

Con la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular NOVEL modelo NIM-100, con una cámara IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador, que posee un software que permite identificar la distribución y tipo de microconstituyente. Para colocar las probetas en el microscopio y evitar una observación distorsionada de las imágenes, se montaron en un dispositivo con plastilina que permitió su nivelación.

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón de la aleación de tantalio B 521 y del AISI 316. Se seleccionó la zona del metal base lo más alejada de donde pudiera tener influencia el ciclo térmico de soldadura.

La figura 2, se corresponde con la aleación de tantalio B 521 en estado de suministro. Se observa una morfología de granos de fase α , característica de la estructura de granos grandes, distribuidos de forma regular en toda el área observada. La figura 3, pertenece a la microestructura de la

aleación AISI 316, la que está compuesta por austenita y ferrita, con un contorno rectilíneo de los granos. Se observan además algunos precipitados dispersos en la matriz.

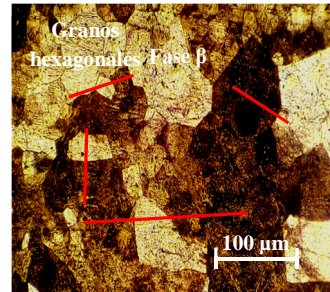


Figura 2. Estructura del Ta.

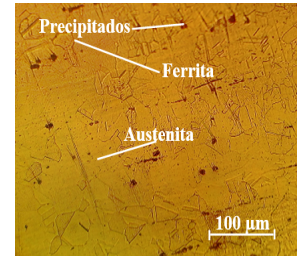


Figura 3. Estructura del AISI 316.

Se efectuó un barrido de dureza en las zonas obtenidas de la unión soldada, para una carga de 50 g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante penetrada en un tiempo de 15 segundos. En la tabla 4, se muestra el procedimiento empleado para evaluar el comportamiento de la dureza en las diferentes zonas para diferentes distancias.

Tabla 4. Procedimiento para evaluar la dureza

D	ZF		ZAC Ta		ZAC AI	
	HV	Prom	HV	Prom	HV	Prom
0,0	HV	HVP				
0,25	HV	HVP				
0,5	HV	HVP				
0,75	HV	HVP				
1,0			HV	HVP		
1,25			HV	HVP		
1,5			HV	HVP		
1,75					HV	HVP
2,0					HV	HVP
2,25					HV	HVP

Se realizaron tres ensayos de dureza en cada zona, las que fueron promediadas. En el barrido se consideraron las zonas que se obtienen del proceso de soldadura, la zona fundida (ZF), la interfase del cordón de soldadura, la zona de influencia térmica (ZIT) a partir de la dureza de ambos materiales base (MB).

3. Resultados y discusión

Las figuras 4, 5 y 6 evidencian el comportamiento microestructural obtenido en la zona fundida de las tres muestras obtenidas del proceso de soldadura.

La unión formada bajo el metal fundido es afectada por la diferencia del punto de fusión entre el tantalio y el acero inoxidable. Por este efecto, existen en lado del tantalio, granos esféricos, como resultados de la tensión superficial en la

piscina de soldadura. Se observa una estructura de dendrita fina, con un tamaño no homogéneo y una orientación determinada debido al rápido enfriamiento del método de soldadura.

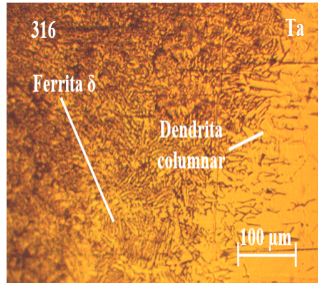


Figura 4. Muestra 1.

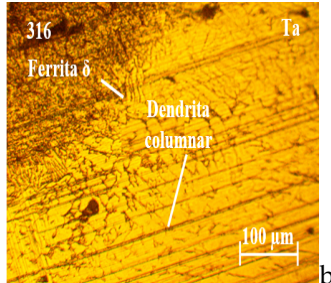


Figura 5. Muestra 2.

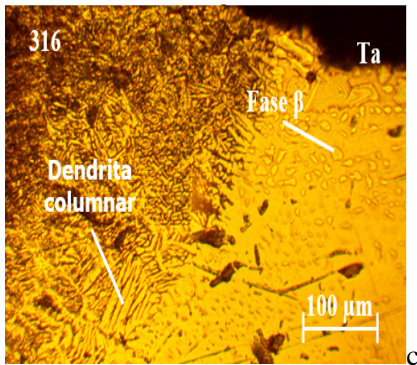


Figura 6. Muestra 3.

La formación de las dendritas de color claro, que se encuentra en los granos de color más oscuro, es debida fundamentalmente al compuesto de hierro. Sin embargo, la mayor cantidad de regiones de dendritas intragranulares, se debe al elevado contenido de tantalio, lo cual ocurre por la rápida solidificación de fusión de este. Se observa la formación de compuestos intermetálicos de Ta y Fe. Bajo el rápido enfriamiento, existe la formación de las dendritas primarias, las cuales no tuvieron tiempo para el crecimiento, por el efecto de la cristalización [12] y [13].

3.1 Microestructura en la zona afectada por el calor

En las figuras 7, 8 y 9 se muestran las microestructuras de la ZAC de la aleación de tantalio B 521 y del acero AISI 316, luego de aplicado el ciclo térmico de soldadura. Se observa que, en esta zona, existe en ambas aleaciones, una estructura de granos recrystalizados. La formación de una microestructura con granos de fase β y granos poligonales en la zona afectada térmicamente, precedida por granos parcialmente fundidos, con características similares a la del metal base en el Ta. En el AISI 316, la formación de austenita, austenita dendrítica y la

ferrita- δ , como resultado de la solidificación del caldo metálico.

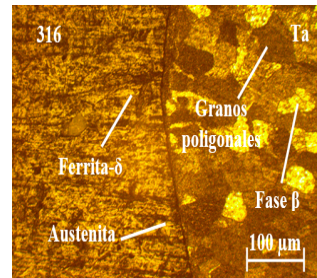


Figura 7. Muestra 1.

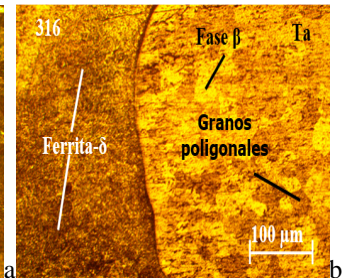


Figura 8. Muestra 2.

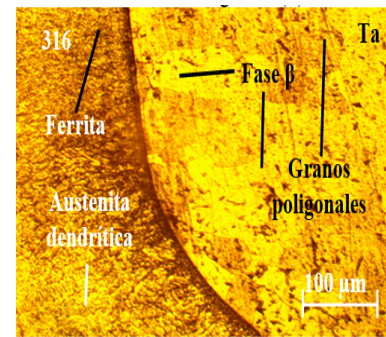


Figura 9. Muestra 3.

En cada una de las estructuras se observa una línea de margen estrecho, lo cual se corresponde con la línea central de la soldadura. Cerca de esta interfase se da el crecimiento epitaxial, siguiendo la solidificación de patrón dendrítico dirigido hacia la dirección a la fuente de calor del arco eléctrico, fundamentalmente en el acero inoxidable. La zona atacada en el borde de esta línea, presumiblemente sea causada por el rápido enfriamiento, puesto que, en el tantalio, la temperatura de recrystalización ocurre en el rango desde 900 hasta 1 200 °C, expuesto también por otro autor [14].

El grado de formación de la ferrita es generalmente bajo, a la transformación de austenita a ferrita es relativamente inactiva y el ciclo térmico en la ZAC es normalmente rápido. Sin embargo, el Fe y el Ta formaron pequeños compuestos intermetálicos, con formación de precipitados finos de segunda fase, dispersos a largo de los límites de grano y dentro del grano. No obstante, en esta zona no se observa defectos de grietas.

3.2 Microestructura en la interfase del cordón

El análisis microestructural correspondiente a la interfase del cordón de soldadura se muestra en la figura 10. La muestra el comportamiento obtenido por efecto de la transferencia de calor, luego de aplicado el ciclo térmico de soldadura.

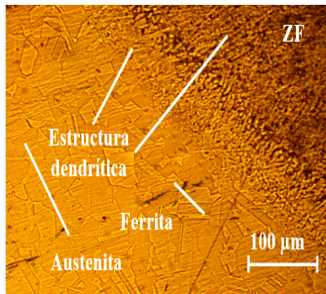


Figura 10. Interfase de la soldadura.

La interfase del cordón muestra un patrón de solidificación dendrítico. La dendrita se hace presente en todo el cordón de soldadura, cerca de la interfase se da el crecimiento epitaxial, siguiendo la solidificación de patrón dendrítico dirigido hacia la dirección a la fuente de calor del arco eléctrico. En esta zona la estructura del grano puede ser controlada con el empleo de métodos que promuevan nucleación en el charco de soldadura.

En esta zona se observa una línea dendrítica, donde el material base es parcialmente fundido, ya que se encuentra en contacto directo con la pileta (cordón de soldadura). En la microestructura se aprecia el crecimiento epitaxial de los granos de forma perpendicular. En esta línea, se obtiene un refinamiento de grano por el choque térmico concedido por la temperatura propia de la soldadura.

En la microestructura ha existido un crecimiento de granos columnares durante la solidificación, formados paralelos a la dirección de la soldadura, presumiblemente por la ocurrencia de las altas temperaturas en esta zona, debido a que la velocidad de enfriamiento es rápida y por la diferencia de fusión del Ta con respecto al AISI 316.

3.3 Evaluación de la dureza en la unión

Las tres zonas obtenidas en la unión fueron analizadas. En la figura 11 se muestran los resultados obtenidos.

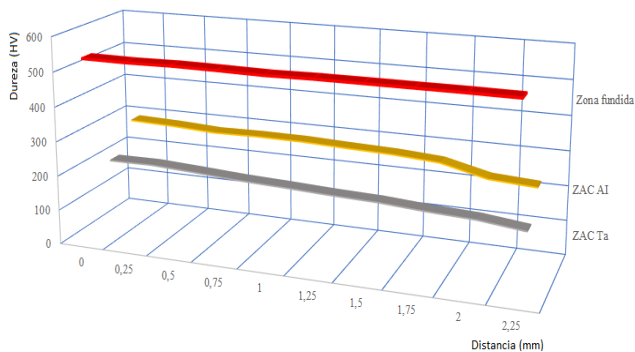


Figura 11. Análisis de la dureza en cada zona.

Para una dureza inicial de aproximadamente HV 140 en la aleación de tantalio y de HV 217 en el acero inoxidable AISI

316, en la zona afectada por el calor, existe un incremento de hasta HV 200 en el primero (línea gris) y de hasta HV 285, para el segundo (línea amarilla), lo cual está en correspondencia con las microestructuras obtenidas, donde los granos no alcanzaron una deformación total. Sin embargo, en la zona fundida (línea roja) la dureza alcanzada es de hasta HV 535. Esto está motivado por la formación de estructura quebradiza en esta zona, que provoca un aumento considerable por el ciclo térmico de soldadura impuesto.

4. Conclusiones

- La unión formada por la aleación de tantalio B 521 y el AISI 316, bajo la transferencia del metal fundido, generó una estructura del tipo columnar tosca, estructuras dendríticas, así como una estructura de una red de células hexagonales y ferrita- δ , ninguna propensa al agrietamiento.
- En la zona afectada por el calor se observó una línea de margen estrecho, que se corresponde con la línea central de la soldadura y cerca de ella existe la formación de un crecimiento epitaxial, con patrón dendrítico en dirección a la fuente de calor del arco eléctrico.
- Se observó un incremento de la dureza, en la zona afectada por el calor, hasta los HV 200, en la aleación de tantalio B 521 y hasta HV 285 en el acero inoxidable AISI 316 y llegó a HV 535 en la zona fundida, motivado por la formación de estructuras quebradizas, lo que permite tomar decisiones sobre la elección de este tipo de unión.

REFERENCIAS

- [1] J. Lippold, D. Kotecki. Welding metallurgy and weldability of stainless steels, 1ra edición. John Wiley & Sons, New Jersey, USA. 2005.
- [2] J. Delgado, R. Ambriz, R. Cuenca-Álvarez, N. Alatorre, F. Curiel, "Heat input effect on the microstructural transformation and mechanical properties in GTAW welds of a 409L ferritic stainless steel". Revista de Metalurgia, vol 52, pp. 1-10, 2016.
- [3] C. Li, Z. Zhu, T. Liu, "Microhardness of pore walls in porous titanium prepared with novel powder metallurgy". Powder Metallurgy, vol 48, pp. 237-240, 2005.
- [4] V. Stelmakh, V. Rinnerbauer, R. Geil, P. Aimone, J. Senkevich, J. Joannopoulos, M. Soljac'ic, I. Celanovic, "High-temperature tantalum tungsten alloy photonic crystals: Stability, optical properties, and fabrication". Applied Physics Letters; vol 103, pp. 1-4, 2013.
- [5] R. Bao, X. Zhang, "An inverse method for evaluating weld residual stresses via fatigue crack growth test data". Engineering Fracture Mechanics, vol 77, pp. 3143-3156, 2010.
- [6] X. Tang, "Phase transformations in Ti-Nb-Ta and Ti-Nb-Ta-Zr alloys". Mater. Sci. vol 35, pp. 1805-1811, 2000.

- [7] A. Miller, A. Daane, C. Habermann, B. Beaudry, "Welding tantalum for high temperature applications". The review of scientific instruments, vol 34, pp. 644-647, 1963.
- [8] B. Greenberg, M. Ivanov, A. Patselov, & Y. Besshaposnikov, "The processes of fragmentation, intermixing and fusion upon explosion welding". AASRI conference on modelling. SciVerse Science Direct. AASRI Procedia, vol 3, pp. 66-72, 2012
- [9] T. Fernández-Columbié, I. Rodríguez-González, R. Correa-Suárez, D. Alcántara-Borges, "Junta de soldadura disímil de la aleación HK-40 y del hierro fundido 24". Ingeniería Mecánica, vol 17, pp.98-107, 2014.
- [10] D. Kotecki, J. Lippold, "Welding metallurgy and weldability of stainless steels". Journal of Materials Processing and Technology, vol 1, pp. 474-483, 2013.
- [11] V. Radhakrishnan, "Hot cracking in austenitic stainless-steel weld metals". Science and Technology of welding and Joined Magazine, vol 5, pp. 25-32, 2000.
- [12] T. Fernández-Columbié, I. Rodríguez-González, D. Alcántara-Borges, A. Salazar-Preval, A. Abad-Brocard, "Caracterización microestructural de uniones soldadas de acero AISI 316L en tuberías". Minería y Geología, vol 32, pp. 60-75, 2016.
- [13] F. Hashim, R. Salim, M. Jaffar, "On the spot brazing and spot soldering of tantalum". Academic Research International, vol 4, pp. 457-467, 2013.
- [14] L. Zhou, T. Yuan, R. Li, J. Tang, G. Wang, K. Guo, "Selective laser melting of pure tantalum: Densification, microstructure and mechanical behaviours". Materials Science and Engineering, vol. 707, pp. 443-451, 2017.