

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE  
UNIONES SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE MEDIANTE  
PROCESO GTAW Y MATERIAL DE APORTE TUBULAR**

**Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico que presenta el bachiller:**

**Bruno Alberto Camacho Medina**

**ASESOR: Dr. Francisco Rumiche**

**Lima, Diciembre de 2014**

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo comprobar la factibilidad de uso de una varilla material de aporte, de geometría tubular, en el proceso de soldadura de un acero inoxidable AISI 316L mediante soldadura GTAW. Se elimina de esta manera la necesidad de uso de gas de protección en algunas de las etapas del proceso generando así un ahorro considerable en la utilización de gas de protección.

Para lograr tal cometido, se ha efectuado ensayos electroquímicos para comparar la resistencia a la corrosión de uniones soldadas con material de aporte convencional y el propuesto en esta investigación.

Todas las muestras fueron sometidas a ensayos de obtención de potencial de corrosión en circuito abierto y a ensayos potenciodinámicos. Se hallaron así valores como intensidad de corrosión y velocidad de penetración de corrosión. En base a los resultados obtenidos se ha podido caracterizar cualitativamente las propiedades de la capa pasiva del material.

Además de los ensayos electroquímicos, se ha realizado también ensayos de metalografía para poder caracterizar la microestructura de las muestras.

Los resultados indican que no existe una pérdida de propiedades anticorrosivas de la unión soldada empleando el material de aporte tubular, todas las microestructuras observadas son adecuadas y los valores obtenidos de velocidad de corrosión e intensidad de corrosión son aceptables, tomando como referencia el metal base AISI 316L cuyos valores de Intensidad de corrosión y velocidad de penetración de corrosión son respectivamente  $3,985 \text{ mg/cm}^2\cdot\text{y}$  y  $5,006 \text{ um/y}$  (obtenidos en la presente investigación) comparados contra los valores del cordón de soldadura del aporte TG-X 316L  $1,881 \text{ mg/cm}^2\cdot\text{y}$  y  $2,363 \text{ um/y}$  y los valores del material de aporte convencional ExsaTIG2010Mo  $2,075 \text{ mg/cm}^2\cdot\text{y}$  y  $2,606 \text{ um/y}$ , se observa que los valores del material de aporte tubular son tan buenos como los obtenidos para las soldaduras realizadas con material de aporte convencional.

Se concluye que es factible la utilización de este material de aporte, particularmente, su mejor utilidad está enfocada en la soldadura de tuberías y tanques, generando así un ahorro considerable en la utilización de gas de protección.



## INDICE

INTRODUCCION	1
Justificación	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
1. CAPITULO 1: ESTADO DE LA TECNOLOGIA.	4
1.1. Aceros Inoxidables	4
1.1.1. Aceros inoxidables austeníticos	4
1.2. Proceso de soldadura GTAW	6
1.2.1. Corriente continua	8
1.2.2. Corriente alterna	9
1.3. Electrodo Tubulares	11
1.4. Corrosión	14
1.4.1. Según forma	15
1.4.2. Según Medio	16
1.5. Métodos para medición de la velocidad de corrosión.	19
1.5.1. Potencial de circuito abierto	20
1.5.2. Ensayo potenciodinámico	20
2. CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	23
2.1. Obtención y preparación de muestras	23
2.2. Metalografía de cordones de soldadura	25
2.3. Preparación de muestras para ensayos electroquímicos	26
2.3.1. Tratamiento de probetas y preparación superficial	26
2.3.2. Dimensiones de probeta	26
2.3.3. Limpieza	26
2.3.4. Exposición de probeta	27
2.4. Ensayos electroquímicos	27
2.4.1. Descripción y parámetros	28
2.4.2. Estereoscopía	29
2.4.3. Curvas de ensayos electroquímicos.	29
3. CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DUSCUSIÓN	31
3.1. Microestructura	31

3.2. Ensayos de obtención de potencial de circuito abierto	34
3.3. Diagramas potenciodinámicos, estereoscopía	38
3.4. Consideraciones adicionales	51
3.5. Conclusiones	54
4. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	56

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de los aceros austeníticos	6
Figura 2: Equipo necesario para el proceso de soldadura GTAW	7
Figura 3: Dirección de viaje de electrones durante el proceso de soldadura GTAW	9
Figura 4: Distribucion porcentual de calor y efectos de la corriente directa y alterna	10
Figura 5: Modos de conexión y efectos según modos de conexión de soldadura GTAW	11
Figura 6: Vista de sección de material de aporte tubular serie TG-X	13
Figura 7 Diagrama esquemático de los 4 elementos necesarios para la corrosión	16
Figura 8: Ejemplo de curvas de polarización anódica. Hierro en Borato de Sodio pH 8.	18
Figura 9: Esquema de circuito potenciostatico.	20
Figura10: Esquema de curvas de polarización, extrapolación de Tafel Evans y Stern	22
Figura 11: Curvas de polarización típicas a diferentes temperaturas.	23
Figura 12: Esquema de procedimiento experimental.	24
Figura 13: Esquema de obtención de muestra de una plancha de AISI 316L	25
Figura 14: Plancha antes de maquinarse, corte y obtención de pastillas de 15 mm	26
Figura 15: Probetas para ensayos metalográficos	26
Figura 16: Muestras circulares para ensayos electroquímicos	26
Figura 17: Diagrama esquemático de celda electroquímica de polarización	29
Figura 18: Instrumentos para ensayos y celda de corrosión electroquímica conectada	30
Figura 19: Cupón de soldadura apuntalado e inspección visual de raíz	32
Figura 20: Inspección visual de raíz	33
Figura 21: Fotografías de metalografía	34
Figura 22: Gráfica de ensayo de OCP para la muestra material base AISI 316L	35
Figura 23: Gráfica de ensayo de OCP para la muestra de cordón de soldadura convencional	35

Figura 24: Gráfica de ensayo de OCP para la muestra de cordón de soldadura tubular	36
Figura 25: Gráfica de ensayo de OCP para la muestra de ZAC con aporte convencional.	36
Figura 26: Gráfica de ensayo OCP para la muestra de ZAC con aporte tubular	37
Figura 27: Gráfica de curvas de obtención de potencial de circuito abierto (OCP)	37
Figura 28: Gráfica de valores de potencial de corrosión de mayor a menos	38
Figura 29: Gráfica de ensayo potenciodinámico para material base AISI 316L	40
Figura 30: Gráfica de ensayo potenciodinámico para cordón de soldadura convencional	40
Figura 31: Gráfica de ensayo potenciodinámico para cordón de soldadura tubular.	41
Figura 32: Gráfica de ensayo potenciodinámico para ZAC con aporte convencional.	41
Figura 33: Gráfica de ensayo potenciodinámico para ZAC con aporte tubular	42
Figura 34: Gráfica de curvas de ensayos potenciodinámicos superpuestas, 5 muestras	43
Figura 35: Gráfica de comparación de curvas de material de aporte convencional y tubular	44
Figura 36: Imagen de estereoscopia antes y después de ensayos	46
Figura 37: Ajuste de Tafel en programa Echem Analyst	48
Figura 38: Gráfica de valores de intensidad de corrosión (IC) de menor a mayor	51
Figura 39: Gráfica de valores de velocidad de penetración en corrosión (VPC)	51
Figura 40: Pérdida de masas en porcentaje de las muestras de cordón de soldadura	55

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición química del acero AISI 316L y material de aporte ER-316L-SI	5
Tabla 2: Análisis químico de material depositado (valores típicos en %)	12
Tabla 3: Propiedades mecánicas del metal depositado.	12
Tabla 4: Parámetros de soldeo recomendados para material de aporte AWS A5.9 ER316L	12
Tabla 5: Análisis químico de materiales de aporte tubulares TG-X308L, 309L, 316L y 347.	13
Tabla 6: Propiedades mecánicas de material de aporte tubulares TG-X 308L, 309L, 316L	14
Tabla 7: Comparacion de tiempos y volúmenes de gas utilizado entre materiales de aporte	14
Tabla 8: Parametros de soldeo de material de aporte convencional y tubular	25
Tabla 9: Valores de potencial de corrosión	38
Tabla 10: Valores de rango de voltaje de pasivación para las 5 muestras	45
Tabla 11: Valores de corriente de corrosión (Icorr) hallados mediante Echem Analyst	49
Tabla 12: Valores de intensidad de corrosión y velocidad de penetración en corrosión	50
Tabla 13: Pérdida de peso en material de aporte convencional en ensayo de inmersión.	53
Tabla 14: Pérdida de peso en material de aporte tubular en ensayo de inmersión.	54

## ABREVIATURAS

- GTAW: *Gas Tungsten Arc Welding*
- CDEN: Corriente directa con electrodo negativo.
- CDEP: Corriente directa con electrodo positivo.
- ZAC: Zona afectada por el calor
- AISI 316L MB: Muestra de material base de acero AISI 316L
- TG-X316L CS: Muestra de cordón de soldadura realizada con material de aporte tubular
- ExsaTIG 2010MO CS: Muestra de cordón de soldadura realizada con material de aporte convencional
- TG-X 316L ZAC: Muestra de Zona afectada por el calor de soldadura realizada con material de aporte tubular
- ExsaTIG 2010 Mo ZAC: Muestra de zona afectada por el calor de soldadura realizada con material de aporte convencional.
- Ecorr: Potencial de corrosión, Voltaje de Pasivación
- Icorr: Corriente de corrosión o Corriente de Pasivación
- IC: Intensidad de corrosión
- VPC: Velocidad de penetración en corrosión.
- EW: Peso equivalente.

## INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable son un grupo de aceros de alta aleación que se utilizan en varias industrias como la textil, la industria de la construcción, en biomedicina, entre otras [1].

Estos aceros están presentes también en la industria alimentaria, por ejemplo en la fabricación de contenedores para yogurt aromatizado. Estos contenedores se utilizan para el transporte, en condiciones de esterilidad, de los concentrados de fruta desde los lugares de producción hasta los centros de elaboración.

El proceso de pasteurización se realiza en intercambiadores de calor con disposición de placas; se prefiere aceros inoxidable de alta aleación como el AISI 316L debido a su elevada resistencia a la corrosión bajo tensión. Esta es una aplicación importante porque existe la posibilidad de este tipo de corrosión a las altas temperaturas alcanzadas en los intercambiadores, y la consecuente presencia de ácido láctico y de constantes productos desinfectantes.

Otro escenario industrial en que puede encontrar es en la industria vitivinícola y de otras bebidas, se utiliza para la fabricación de recipientes para la fermentación y obtención del vino. Se emplea en recipientes en los que se va a exponer al acero a altas temperaturas y algunos componentes muy agresivos como el anhídrido sulfuroso. Otra de las aplicaciones de estos aceros, principalmente el AISI 316L, se encuentra en la fabricación de recipientes para tratamiento y conservas de vegetales y zumos de frutas, las instalaciones para el tratamiento del tomate y su concentración en conserva se realizan también con aceros inoxidable[2], dado que para estas industrias se necesitan materiales que tengan una excelente resistencia a la corrosión. El método de fabricación de los componentes de maquinaria o recipientes, es de suma importancia para garantizar la buena calidad, buen funcionamiento, durabilidad y excelente desempeño de estos componentes, siendo además deseable que este método de fabricación sea económico y de excelentes resultados.

La soldadura es utilizada a nivel industrial como uno de los métodos de unión de piezas y componentes más común de todos por conferir a las uniones propiedades similares mecánicamente a los materiales a unir. Como ya conocemos, la estructura metálica que se desee fabricar será tan fuerte como lo sean sus uniones por soldadura, dado que la zona afectada por el calor (ZAC) posee propiedades diferentes al

resto del metal material base, en el caso de recipientes y tuberías presurizadas, por ejemplo, la resistencia mecánica de las uniones soldadas determina la resistencia de toda la estructura. Por ello la soldadura representa un importante factor en la estimación de la reducción de la vida útil de dichos componentes [1]. El proceso de soldadura GTAW cumple con los requisitos de brindar a la unión soldada, excelentes propiedades mecánicas, buena resistencia a la corrosión de la junta, así como durabilidad. Sin embargo una de las desventajas de este proceso de soldadura es que, como su nombre lo indica, GTAW (Gas tungsten Arc Welding) utiliza como parte del proceso de soldadura una protección de gas, que se suministra por una tobera alrededor del electrodo de tungsteno no consumible, este gas suele ser helio, argón o una mezcla de los dos, lo que hace que al final el proceso sea costoso, pero necesario. Para el proceso de soldadura se utiliza material de aporte, que consiste en una varilla de acero delgada sólida que se va introduciendo en el charco de soldadura.

En este contexto, el presente tema de tesis está enfocado en evaluar la factibilidad técnica de usar un nuevo tipo de material de aporte de geometría tubular, en cuyo interior se colocan elementos aleantes y otros componentes químicos para proteger el charco de soldadura durante el proceso de soldadura con la finalidad de eliminar la utilización de gas de protección y así obtener un ahorro en costos de operación de la soldadura GTAW.

### **Justificación**

Se necesita determinar la resistencia a la corrosión de probetas de soldadura con el electrodo tubular y compararlas con un proceso de soldadura convencional como parte del proceso de evaluación de este nuevo electrodo tubular, de esta manera, se determinará si es viable o no su utilización mediante la soldadura GTAW sin gas de protección, y así reducir los costos de operación de este proceso.

### **Objetivo general:**

- Evaluar la resistencia a la corrosión de uniones soldadas de acero inoxidable con proceso GTAW y material de aporte tubular.

### Objetivos específicos

- Realizar una revisión apropiada de la literatura técnica.
- Seleccionar las probetas para los ensayos de corrosión.
- Caracterizar estructuralmente las probetas.
- Realizar los ensayos de corrosión (electroquímicos).
- Analizar y comparar los resultados de la resistencia a la corrosión.



## CAPITULO 1

### ESTADO DE LA TECNOLOGIA

#### **1.1. ACEROS INOXIDABLES**

Los aceros inoxidable son un importante grupo de aceros que fueron desarrollados entre 1910 y 1914 con muy buenas características, su principal fortaleza se muestra en su gran capacidad para resistir la corrosión. Esto se debe a que presentan una capa protectora de óxido de cromo fina uniforme y estable que los protege del medio agresivo. Muchos de estos aceros también poseen otros elementos como molibdeno, y níquel. Este último elemento favorece la formación de la capa de óxido de cromo y aumenta su estabilidad. Los aceros inoxidable se clasifican en ferríticos, martensíticos, austeníticos, dúplex y endurecibles por precipitación. De manera general, los aceros austeníticos son los que poseen mejores propiedades anticorrosivas [3]

##### **1.1.1. Aceros inoxidable austeníticos**

Estos aceros constituyen la serie 3XX y 2XX de acuerdo a la designación para aceros inoxidable del American Institute for Steel and Iron, son aceros aleados con cromo y níquel (serie 3xx) cromo, níquel y manganeso (serie 2xx). Estos aceros son no magnéticos en la condición de recocido y no endurecen cuando se les aplica un tratamiento térmico. El contenido total de cromo y níquel es aproximadamente 23%, son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinar a menos que posean en su composición química azufre y selenio.

La aleación básica de los aceros inoxidable austeníticos, la 302, se ha modificado formando una familia de 22 aleaciones relacionadas. Por ejemplo los aceros del tipo 304 se han mejorado teniendo en cuenta la soldabilidad y la precipitación de carburos, con un máximo de carbono de 0.08%, posteriormente a este acero esta el 304 L que reduce aún más el contenido de carbono (hasta 0.03%) con el fin de disminuir aún más la precipitación de carburos en el intervalo de enfriamiento desde 1500 F hasta 800 F. Si bien se logra el cometido, hay otro problema de precipitación cuando se suelda en pasadas múltiples, para esto se recomienda usar los grados esta-

bilizados tipo 321 con Columbio o Tantalio, elementos que sirven para precipitar un elemento diferente al del cromo, logrando así que este se retenga en solución [3], y así, los siguientes aceros de la serie han sido diseñados para lograr satisfacer un conjunto de necesidades según las solicitudes, método de fabricación y medio al cual estarán expuesto. El acero a utilizar para el desarrollo de esta investigación, es el acero inoxidable AISI 316L, el cual es una aleación inoxidable muy utilizada en procesos industriales que requieren elevada resistencia a la corrosión. Sus principales componentes se muestran en la Tabla 1. La Tabla presenta también la composición química del material de aporte típico para la soldadura de este acero.

Material Base	Composición Química (% en peso)									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	O*	N*
AISI316L	0,02	1,27	0,42	0,03	0,024	17,24	11,23	2,21	21	125
ER-316L-SI	0,02	1,65	0,92	0,02	0,022	19,16	12,28	2,51	-	-

Tabla 1. Composición química del acero AISI 316 L y del material de aporte para soldadura ER-316L-SI [4].

El componente químico a resaltar de este acero es el 2 a 3% de molibdeno que posee, elemento que lo hace muy resistente a las picaduras causadas por elementos como el flúor, cloro, bromo y yodo, por lo tanto está en capacidad de resistir la acción corrosiva de diferentes agentes químicos que se encuentran en general en la industria, especialmente en la industria textil, equipo para pulpa y papel, así como la fabricación de implantes quirúrgicos. Otra propiedad conferida por el molibdeno es que aumenta la resistencia a la fluencia del material a altas temperaturas a través del endurecimiento por solución sólida, lo que lo hace bueno para fabricación de equipos para generación de energía a partir de combustibles fósiles, refinерías, petroquímicas y plantas químicas en general. Su estructura austenítica representa también una ventaja para trabajar a temperaturas criogénicas en comparación con otros aceros inoxidables. [4].

En la figura 1 se muestra los diferentes aceros que derivan del 302, entre ellos el acero AISI 316 L.

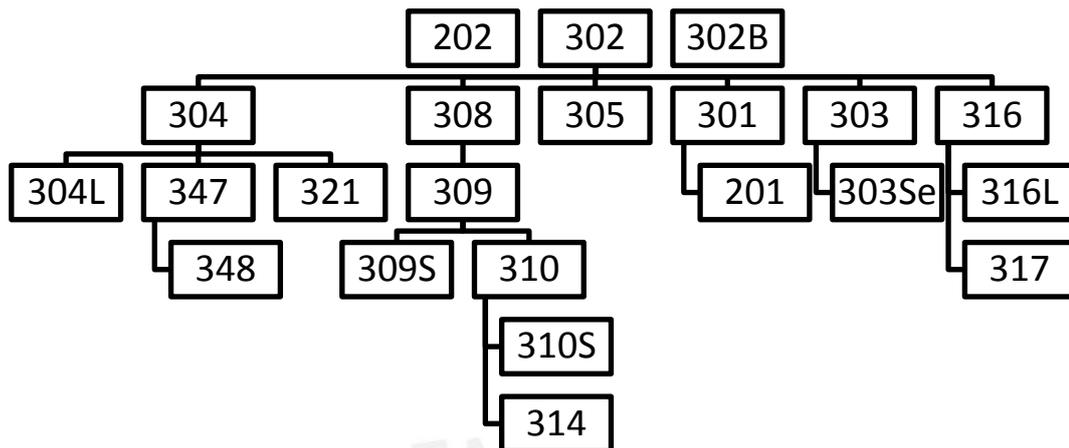


Figura 1. Clasificación de los aceros austeníticos. [3]

## 1.2. PROCESO DE SOLDADURA GTAW.

Uno de los procesos de soldadura más utilizado para la fabricación de componentes con acero inoxidable es el proceso GTAW (*gas tungsten arc welding*). Este es un proceso de soldadura en el cual se produce la unión de los metales por calentamiento a consecuencia del calor generado por el arco eléctrico. La principal característica de este proceso es que utiliza un electrodo no consumible, además de que, con el propósito de mejorar la unión soldada, utiliza un gas inerte (Argón o Helio o la mezcla de ambos) para generar una atmósfera de protección. La utilización de este gas de protección hace que el proceso sea más caro que otros procesos de soldadura [4].

Este proceso tiene muchas ventajas con respecto a otros procesos de soldadura, pero también algunas desventajas que tenemos que considerar:

- Proporciona un excelente control del baño de soldadura.
- Permite la soldadura de metales sin usar aporte.
- Permite la mecanización y automatización del proceso.
- Produce soldaduras de alta calidad y excelente terminación.



Tal como se aprecia en la figura se necesita (1) una fuente de poder, (2) control de pedal para accionar la máquina, (3) la pieza de trabajo a soldar, (4) la pinza de sujeción de material base, esta pinza conecta la energía eléctrica a la pieza base, (5) la antorcha TIG en la que se encuentra el electrodo no consumible y, alrededor la tobera de expulsión de gas, (6) manguera de salida de refrigerante, (7) manguera de entrada de refrigerante, (8) sistema de refrigeración, y (9) gas protector.

Puesto que el proceso de soldadura TIG o GTAW trabaja con una fuente de corriente eléctrica, con la finalidad de obtener diferentes resultados o aplicaciones, se tiene la opción de suministrar 2 tipos de corriente y distintas polaridades a la antorcha y al material base a través de la pinza de sujeción. Estas son:

### **1.2.1. Corriente continua:**

La corriente continua proporciona un flujo de electrones en una sola dirección, sea desde el electrodo hacia el material base (polaridad continua) o sea desde el material base hacia el electrodo (polaridad inversa)

Las diferentes polaridades de conexión del proceso GTAW generan diferentes efectos tanto sobre el material base como el electrodo. Cuando la corriente fluye, se produce un viaje de electrones desde el polo negativo de la conexión (ánodo) hacia el polo positivo de la conexión (cátodo).y los iones del gas protector que son positivos viajarán en sentido contrario a los electrones tal como se muestra en la figura 3. Se produce distintas intensidades de calor en el cátodo y en el ánodo, El calor se produce a causa del choque de los iones positivos de gas en la superficie del cátodo, sin embargo, se produce mayor cantidad de calor en la superficie del ánodo puesto que los electrones son acelerados desde el cátodo, esta adquisición de energía cinética, se transforma al final en energía calorífica en la superficie del material.

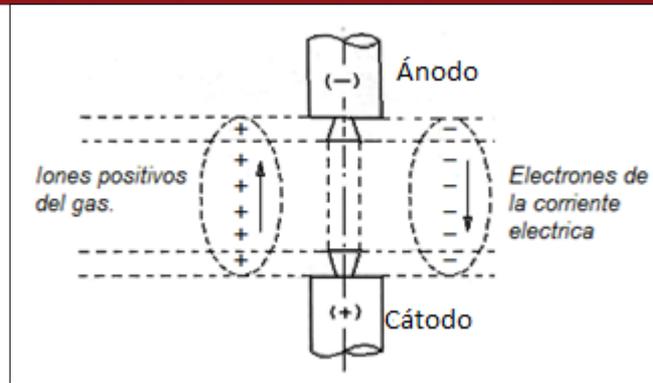


Figura 3. Dirección de viaje de los electrones durante el proceso de soldadura GTAW [4]

Dependiendo de la dirección del viaje de electrones la polaridad puede ser:

#### 1.2.1.1. Polaridad directa:

Se da cuando la pistola con el electrodo de tungsteno está conectada al cátodo, que es el polo negativo de la conexión, y los electrones viajan desde la punta del electrodo hacia el material base, estrellándose así con la superficie lo que genera que el calor se concentre en su mayoría en la superficie del material base, produciéndose en este el 70 % del calor generado por el arco eléctrico. El resultado es una mayor capacidad de penetración del arco eléctrico en el material base, la punta del electrodo de tungsteno permanece más fría (30% de calor) conservando así su afilado original. [4]

#### 1.2.1.2. Polaridad inversa:

En el caso de la polaridad inversa sucede todo lo contrario. El viaje de electrones en este caso se da desde el material base, que está conectado al cátodo, hacia el electrodo de tungsteno que representa al ánodo en la conexión eléctrica. El resultado de modo de conexión es que los electrones chocan con el electrodo y generan 70% del calor en su superficie, La pieza por su lado, permanece más fría, con solo el 30 % del calor generado en el proceso. El resultado es, un material base más frío, y, que el electrodo, a causa de la gran cantidad de calor generado, pierde filo en la punta y se redondea.

#### 1.2.2. Corriente Alterna

Cuando se conecta el material base y el electrodo a una fuente de energía alterna, se da un flujo de corriente en ambos sentidos, por intervalos de tiempo muy cortos, ha-

ciendo que al final haya un flujo de electrones equilibrado en ambos sentidos, y por ende, una equitativa distribución de calor entre el electrodo y el material base. 50-50%.

Se muestra en la figura 4 a continuación los distintos efectos generados por cada una de las polaridades posibles de conexión.

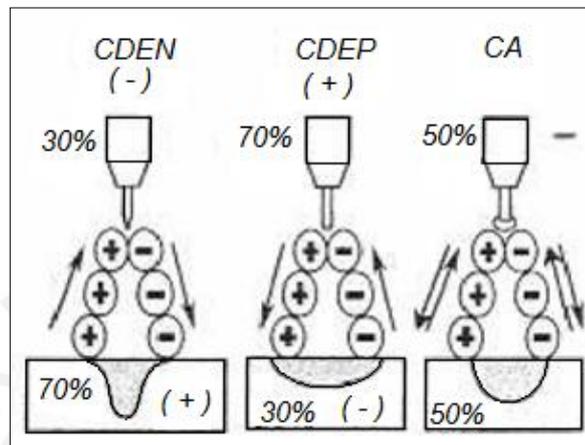


Figura 4. Distribución porcentual de calor y efectos de la corriente directa con electrodo negativo (CDEN), electrodo positivo (CDEP) y corriente alterna (AC) [4]

Estos diferentes modos de conexión se aplican en distintas situaciones, La conexión de corriente directa y electrodo negativo (**CDEN**) se utiliza para soldadura de acero inoxidable y titanio, y el resto de metales, este modo de conexión es el más utilizado de todos, Este tipo de conexión permite trabajar con mayores intensidades de corriente, sin que el electrodo se funda.

La conexión de corriente directa electrodo positivo (**CDEP**) se utiliza para soldadura de aluminio y magnesio, Dado que la corriente fluye hacia el electrodo, se produce, como ya se mencionó un menor aporte de calor al material base, con la desventaja que el electrodo de tungsteno se funde en el proceso y la punta se redondea. Dado que el aluminio y también el magnesio poseen una capa protectora de óxido, es necesario limpiar esta capa de óxido superficial. Por ello se utiliza el modo CDEP porque de esta manera, se produce un bombardeo de iones positivos hacia el metal a soldar, lo que contribuye a limpiar esta capa.

La conexión de corriente alterna **AC** es, por definición, cuando la corriente fluye el 50% del tiempo como CDEN y el otro 50% de tiempo como CDEP, en periodos de tiempo muy cortos, esto proporciona al proceso de soldadura las ventajas propias de ambos modos de conexión, un moderado aporte de calor en el material, base, así como en el electrodo, proporciona la capacidad de soldar aluminio, magnesio, y otros metales con capas de recubrimiento de óxidos, con la ventaja de que no se genera el calor suficiente en la punta del electrodo como para producir o generar su fundición. En la figura 5 se muestran los efectos de la soldadura en los tres modos diferentes de conexión.

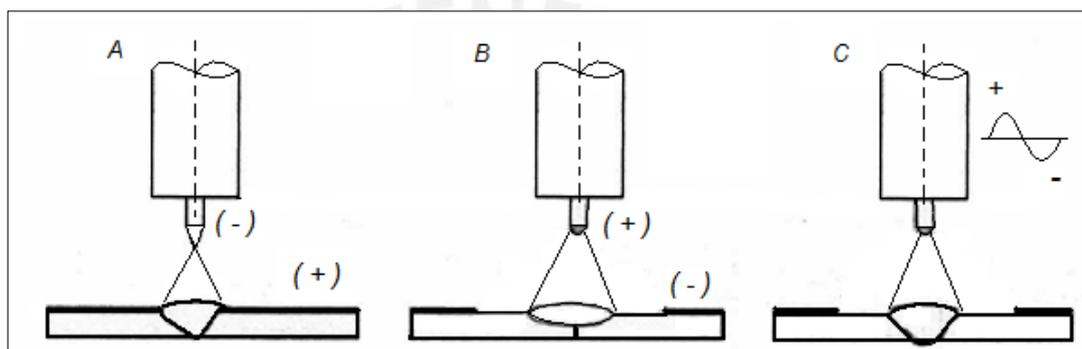


Figura 5. A. modo de conexión CDEN. B modo de conexión CDEP. C modo de conexión AC. [4]

Se puede observar en la figura que tanto los modos CDEP y AC (figuras B y C) remueven los óxidos de la superficie del metal base, pero poseen menor capacidad de penetración que el modo CDEN. (Figura A)

### 1.3. ELECTRODOS TUBULARES:

El material de aporte convencional para el proceso de soldadura GTAW es una varilla de metal sólida que se va introduciendo en el charco de soldadura lentamente. Los proveedores locales como Soldexa comercializan este tipo de varillas para soldadura, particularmente para soldadura del acero AISI 316L se recomienda usar el material de aporte TIGFIL 2010Mo cuya clasificación AWS es A5.9 ER316L. Este material de aporte es una varilla sólida cuyo depósito es un acero inoxidable austeno ferrítico de bajo contenido de carbono (0.03%). Su depósito tiene una excelente resistencia mecánica y resistencia a la corrosión hasta temperaturas por debajo de

400 °C. Se aprecia en las siguientes tablas su composición química, propiedades mecánicas y parámetros de soldeo recomendados. [6].

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
Max 0,03	1,00 2,50	0,30 0,65	Max. 0,020	Max. 0,020	2,00 3,00	11,00 14,00	18,00 20,00	-	-

Tabla 2: Análisis químico del metal depositado (valores típicos) en %. [6]

Tratamiento Térmico	Resistencia a la tracción [Mpa (psi)]	Límite de fluencia [Mpa (psi)]	Elongación En 2'' [%]	Energía absorbida ISO-V(-60 C) [J]
Sin tratamiento	585 (84 825)	430 (62 350)	>35	125

Tabla 3: Propiedades mecánicas del metal depositado. [6]

Diámetro [mm (pulg.)]	2,50 (3/32'')	3,25 (1/8'')
Polaridad	Corriente continua electrodo al negativo (DCEN)	
Gas protector	100% Ar	
Amperaje (A)	20-150	30-250
Voltaje (V)	9-15	10-20
Flujo de gas (l/min)	5-15	5-15

Tabla 4: Parámetros de soldeo recomendados para material de aporte AWS A5.9 ER316L [6].

A diferencia del material de aporte sólido, el material de aporte tubular de la serie TG-X tiene una geometría diferente, como su nombre lo indica, es una varilla hueca por el centro que posee fundente, similar al electrodo en el proceso de soldadura *Flux Cored Arc Welding* (FCAW). Uno de los proveedores de este tipo de material de aporte es la empresa *Kobelco Welding of America* en cuyos catálogos podemos observar las propiedades de esta particular varilla y compararlas con las propiedades del material de aporte convencional.

Es importante mencionar que la serie TG-X de material de aporte tubular de Kobelco Welding puede eliminar la utilización de gas de protección. En particular para la soldadura de tuberías con material de aporte convencional se debe utilizar gas de protección porque sin este no se lograría una penetración correcta en la parte trasera de la junta, esto se debe a la significativa oxidación de la soldadura en la pasada de raíz dado el alto contenido de cromo en la soldadura, por lo tanto el gas de protección es una necesidad en este procedimiento. En contraste el material de aporte tubular, po-

see un núcleo fundente que, en el momento de realizar la pasada de raíz, se funde formando escoria líquida que fluye hacia el lado interior de la tubería cubriendo uniformemente y protegiendo al cordón de soldadura que aún está solidificando del nitrógeno y oxígeno del ambiente. Una vez que el cordón enfría, la escoria solidifica en forma de una capa delgada interior a la tubería que fácilmente se puede desprender dando golpes suaves con un martillo. [7]

Se muestra a continuación en la figura 6 y en las tablas 5, 6 y 7 la sección transversal de la varilla TG-X316L, las propiedades químicas, las propiedades mecánicas y una comparación de ahorro en tiempo de soldadura y caudal de gas de protección respectivamente; puesto que, como ya se mencionó, este material de aporte permite el ahorro en gas de protección.

En la tabla 7 se puede apreciar que con varillas tubulares TG-X se pueden manejar separaciones de raíz ligeramente mayores que con varillas sólidas convencionales, además se puede ver también que el proceso de soldadura con varillas TG-X supone un ahorro en tiempo significativo para la soldadura de tuberías, así como también un menor flujo de volumen de gas protector, lo que acarrea menores costos en operación.

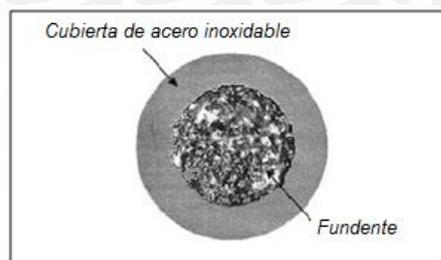


Figura 6: Vista de sección de material de aporte tubular serie TG-X. [7]

Aleación	C	Si	Mn	Cr	Ni	Otros
TG-X308L	0,018	0,80	1,66	19,62	10,31	-
TG-X309L	0,017	0,81	1,52	24,26	12,62	-
<b>TG-X316L</b>	<b>0,016</b>	<b>0,87</b>	<b>1,55</b>	<b>18,89</b>	<b>12,47</b>	<b>Mo: 2,32</b>
TG-X347	0,020	0,80	1,60	19,09	10,21	Nb: 0,68

Tabla 5: Análisis químico de materiales de aporte tubulares TG-X 308L, 309L, 316L, y 347. [8]

Aleación	O,2% P.S (psi)	Resistencia a la traccion(psi)	Elongacion (%)	Resistencia al impacto a 32 F (pies-libra)
TG-X308L	65,250	92,800	47	94
TG-X309L	76,850	98,600	32	80
<b>TG-X316L</b>	63,800	87,000	38	88
TG-X347	66,700	91,350	48	94

Tabla 6: Propiedades mecánicas de materiales de aporte tubulares TG-X 308L, 309L, 316L, y 347. [8]

Requisitos		Material de aporte					
		TGX		Convencional		Convencional	
Diámetro de tubo (pulg.)		2				12	
Luz en Raíz		5/64		1/16		7/64	
Metodo de protección		-	Local (12 pulg)	Total 236 (pulg)	-	Local (12 pulg.)	Total 236 (pulg)
Tiempo (min.)	Pre purga	-	0,2	4,0	-	5,2	104,0
	Ajuste de modelo	-	10,0	-	-	10,0	-
	Soldadura	6,0	5,2	5,2	35,0	30,0	30,0
	<b>TOTAL</b>	<b>6,0</b>	<b>15,4</b>	<b>9,2</b>	<b>35,0</b>	<b>45,2</b>	<b>134,0</b>
Caudal de gas (pies <sup>3</sup> /hr.)	Pre purga	-	0,2	3,3	-	4,3	86,3
	Proteccion de respaldo.	-	1,5	1,5	-	8,5	8,5
	Proteccion en soldadura	1,6	1,4	1,4	9,3	7,9	7,9
	<b>TOTAL</b>	<b>1,6</b>	<b>3,1</b>	<b>6,2</b>	<b>9,3</b>	<b>20,7</b>	<b>102,7</b>

Tabla 7: Comparación de tiempos y volumen de gas utilizado entre material de aporte TG-X y varillas sólidas convencionales. [8].

#### 1.4. CORROSIÓN

La corrosión es el fenómeno mediante el cual un metal se deteriora en contacto con un medio determinado, puede ser el ambiente exterior o algún otro medio que favorezca este deterioro. Se da porque todos los metales, forman un sistema termodinámicamente inestable, y por ello tienden a liberar energía hacia el medio en el que están, reaccionando con el oxígeno presente mediante reacciones de oxidación-reducción. Estos liberan electrones reduciendo su nivel de energía a una sustancia más estable [9]

La corrosión se clasifica en dos grandes grupos:

#### **1.4.1. Según la forma:**

##### **1.4.1.1. Corrosión uniforme:**

Es cuando el ataque del medio se produce sobre toda la superficie del material, es la más benigna de todos los tipos.

##### **1.4.1.2. Corrosión localizada:**

Es cuando la corrosión se concentra en determinadas zonas del material, dependiendo de los parámetros involucrados puede ser:

###### **1.4.1.2.1. Corrosión por picaduras:**

Tipo de corrosión altamente localizado, que se manifiesta con pequeños hoyos que penetran el metal y pueden generar una perforación. Los hoyos aparecen aleatoriamente en la superficie del material dependiendo de los factores a los que se someta el metal [9]. En la presente investigación. Se generan picaduras a causa de las altas corrientes registradas en los ensayos potenciodinámicos, más allá de la zona de transpasivación.

###### **1.4.1.2.2. Corrosión intergranular:**

Tipo de corrosión que se produce en los límites de grano debido a la formación de carburos de cromo en estas regiones [9] Para evitar este tipo de corrosión se utiliza aceros con muy bajo contenido de carbono, menor a 0.02% de tal manera que se evita la formación de carburos de cromo por déficit de carbono. La adición de Molibdeno en los aceros ayuda a prevenir este tipo de corrosión dado que el cromo se combina más fácilmente con este elemento previniendo así la formación de carburos de cromo.

###### **1.4.1.2.3. Corrosión por resquicios:**

Tipo de corrosión que es localizada, que se da a causa de las irregularidades del metal, el medio, o la geometría que éste posee. El ataque corrosivo puede variar desde corrosión localizada leve o regular, hasta picaduras profundas. Una manera de prevenir este tipo de corrosión es generar uniones soldadas sanas, sin sobremonta excesiva, porosidades, o resquicios [9].

#### 1.4.1.2.4. Corrosión bajo tensión:

Se produce por factores mecánicos muy específicos que generen esfuerzos de tensión en el material y además del medio al cual este expuesto el metal. [9] Este tipo de corrosión se produce, en el acero AISI316L, bajo condiciones específicas como lo son, la exposición a ambientes con cloruros, altas temperaturas y el metal sometido a esfuerzos residuales, que pueden ser provocados por el proceso de soldadura.

#### 1.4.2. Según el medio:

##### 1.4.2.1. Corrosión química:

Reacción del metal con un medio no iónico. Las reacciones químicas no generan un flujo de electrones porque los elementos involucrados no cambian su valencia [10]

##### 1.4.2.2. Corrosión electroquímica:

La mayoría de los materiales en ingeniería se disuelven mediante reacciones electroquímicas. Para que exista corrosión electroquímica en un metal, se requiere de cuatro elementos básicos para ello: un ánodo, que es donde ocurre la reacción de oxidación, un cátodo, que es donde ocurre la reacción de reducción del otro material que interactúa en el proceso, un medio electrolítico para la conducción de los iones entre los 2 polos y una conexión eléctrica para la conducción de electrones entre los 2 sitios de reacción.

Se muestra en la figura 7 a continuación los cuatro elementos necesarios para la corrosión electroquímica.[10]

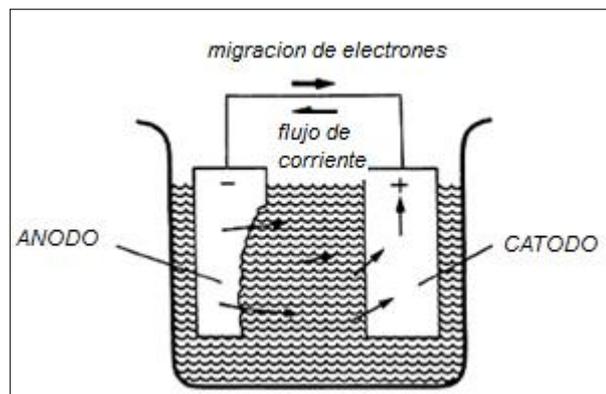


Figura 7: Diagrama esquemático de los cuatro elementos necesarios para la corrosión electroquímica. El cátodo y ánodo no tienen necesariamente que ser de materiales diferentes. [10]

Mientras no fluya corriente eléctrica, todo el sistema estará en equilibrio, una vez que se cortocircuita el sistema, y se introduce una corriente, se producirá en el ánodo una liberación de electrones que será recibida por el cátodo [10]

Para la evaluación de la corrosión mediante ensayos electroquímicos en los aceros es importante tener en cuenta dos conceptos importantes que se muestran a continuación:

#### **1.4.2.2.1. Curva de polarización anódica:**

Esta curva es el resultado de evaluar en la corrosión electroquímica la corriente que circula por el circuito armado en función del potencial. Esta curva muestra que la corriente tiene un comportamiento característico a medida que se aumenta el potencial en los polos.

La curva de polarización anódica nos indica que todos los aceros inoxidables sometidos a una corrosión electroquímica, tienen rangos en los que la capa protectora se destruye o se regenera dependiendo de la densidad de corriente. La figura 8 permite identificar tres regiones importantes. La primera es la región activa, en esta región la corriente aumenta conforme aumenta el voltaje hasta llegar a un punto máximo, posteriormente a este punto máximo llamado corriente límite de corrosión la corriente decae rápidamente para entrar posteriormente en la zona de pasivación. En la zona de pasivación la corriente disminuye a tal punto que permite la formación de óxidos y productos de corrosión que forman una capa protectora impidiendo que el metal se disuelva en el medio corrosivo. La última zona es la zona de transpasividad, en esta zona se produce destrucción localizada de la capa protectora, permitiéndose la disolución del metal en el medio corrosivo. [11]. Se puede apreciar esta curva dibujada en la figura 8.

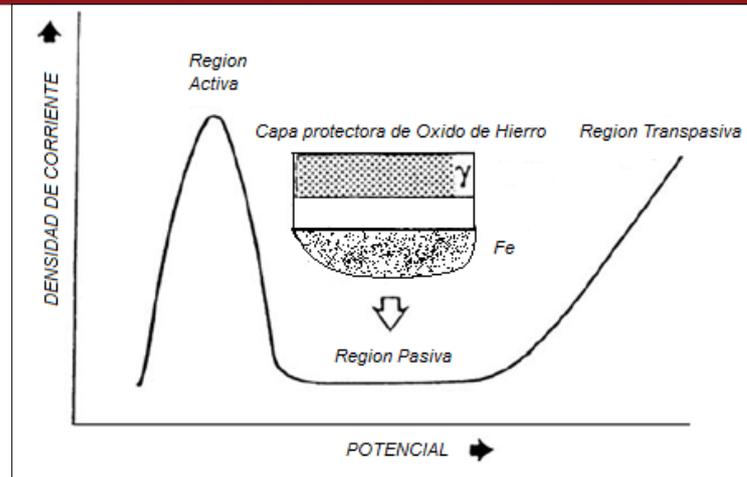


Figura 8: Ejemplo de curva de polarización anódica. Curva de polarización anódica del hierro mostrando comportamiento pasivo y activo en solución de borato de sodio con pH 8.4 [11]

#### 1.4.2.2.2. Curva de polarización catódica:

La curva de polarización catódica es el resultado de medir la corriente de la misma forma en que se midió para el caso anterior solo que el metal que anteriormente era ánodo, ahora se comporta como cátodo. De esta forma, midiendo ambas corrientes, y cruzando sus gráficas, se puede determinar la velocidad de corrosión. Este punto estará en el cruce de las corrientes de las curvas anódica y catódica, y para que un metal no sufra de corrosión, lo ideal es que éste se encuentre en la zona de pasivación.

Las principales consecuencias negativas de la corrosión dependiendo de la aplicación son:

- Perforación de componentes tales como tanques o tuberías, originando fugas de fluidos o gases.
- Pérdida de resistencia cuando se trata de elementos estructurales, pérdida que conlleva al fallo posterior de la estructura.
- Deterioro de acabados, cuando se trata de un acabado superficial que cumple una función decorativa.
- Contaminación de las sustancias en contacto con el metal corroído, cuando se trata de industria alimentaria.

Existen muchos factores que influyen en la resistencia a la corrosión de una unión soldada, tales como: [13]

- Diseño de soldadura.
- Técnica de fabricación.
- Técnica del proceso.
- Contaminación con humedad.
- Residuos y salpicadura en el proceso de soldadura.
- Porosidad y fisuras.
- Tensiones residuales.
- Acabado superficial.
- Mala elección del material de aporte.

Dentro de los factores metalúrgicos están otros como la microsegregación, precipitación de fases secundarias, volatilización de los elementos aleantes en el charco de soldadura durante el proceso, crecimiento de grano en la zona afectada por el calor entre otros [13].

### 1.5. MÉTODOS PARA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Los estudios de corrosión electroquímica, que sirven para obtener parámetros como la velocidad de corrosión y en general determinar el comportamiento del material analizado, utilizan frecuentemente un circuito potencioestático, que incluye normalmente una celda de polarización como se muestra esquemáticamente en la figura 9.

En el potencioestato se utilizan tres tipos de electrodo mostrados en la figura. El electrodo W “*working electrode*” que es la probeta que se está investigando; el electrodo C, llamado contra electrodo, y un electrodo de referencia que tiene una conexión electrolítica con el electrodo W mediante un puente salino que es un tubo estrecho que se coloca cerca del electrodo W [14]



de potencial a la muestra comenzando en el ya hallado potencial de corrosión, realizando un barrido de potencial hasta un límite fijado en los parámetros. Si el potencióstato aplica potenciales mayores a  $E_{corr}$ , se registrará en una gráfica de Potencial versus Log de corriente una curva de polarización anódica, mientras que si se aplica a la muestra potenciales inferiores a  $E_{corr}$ , se registrará una curva de polarización catódica [21]. La interpretación de estos datos se realiza mediante la teoría de Tafel que se muestra a continuación.

El diagrama de Evans [15] permite la determinación del punto de corrosión donde las líneas del hidrógeno catódico y el metal anódico se interceptan. Por otro lado, el comportamiento electroquímico denotado por el diagrama de Stern catódico y anódico también se usa para determinar el punto de corrosión simplemente extrapolando los segmentos lineales de las dos curvas hasta que se intercepten. Este último método es ampliamente utilizado en estudios electroquímicos de metales puros y sus aleaciones. El diagrama de Stern representa un comportamiento de polarización que puede ser determinado experimentalmente usando el método potencióstático y potenciodinámico [15]

En el momento en que empieza a fluir la corriente, es importante tomar nota de diferentes parámetros de polarización como la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y pendientes de Tafel ( $\beta_a$  y/o  $\beta_c$ ) y posteriormente el comportamiento de la corrosión puede ser revelado por las curvas de polarización ( $E$  vs  $\log i$ ). Diagrama de Evans y diagrama de Stern como se muestra en la figura 10. [15]

Para el caso de materiales que presenten capa de pasivación (como lo es el AISI316L) la forma de la curva de polarización presenta una zona en la que el potencial aumenta, sin embargo la corriente de corrosión no aumenta, como ya se vio anteriormente.

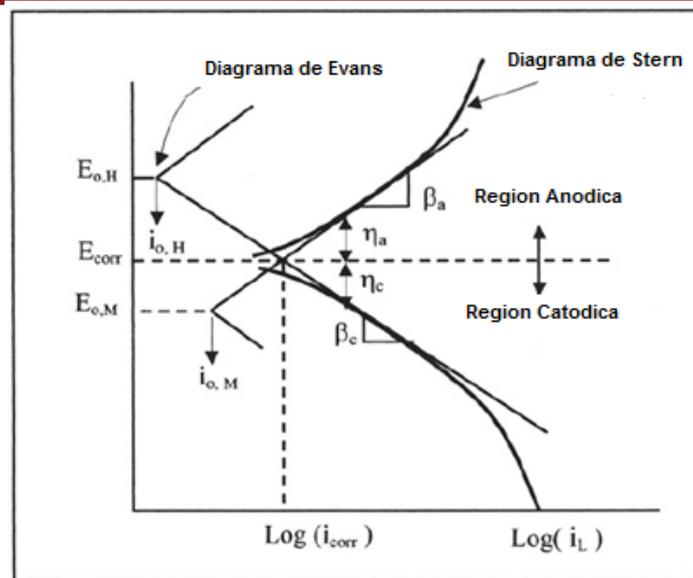


Figura 10: Esquema de curvas de polarización, diagramas de Evans y Stern mostrando la extrapolación de Tafel. [15]

El ensayo electroquímico hace que se corroa la pieza a ensayar de manera general, pero adicionalmente se pueden hacer ensayos con otras consideraciones para poder determinar otros tipos de corrosión como por ejemplo las picaduras. Este ensayo adicional practicado es el galvanostático.

Anees U Malik y Saleh A. Al-Fozan realizaron un estudio sobre el comportamiento de la corrosión por picadura del acero inoxidable AISI 316L en agua de mar del Golfo Pérsico [16].

Utilizaron este ensayo con el fin de obtener indicadores como el potencial de picadura, potencial de protección y la velocidad o tasa de corrosión, para el AISI 316L bajo diversas condiciones. Utilizaron el potencióstato/galvanostato EG&G modelo 273 con el software “*soft corrosion*” 342. Utilizaron como electrodo de referencia un electrodo de calomel. Y como contra electrodo, electrodos de grafito [16]

Se utilizó el ensayo galvanostático, para hallar el diagrama potencial vs tiempo, para determinar el potencial anódico en función del tiempo a densidad de corriente constante, de esta manera, se pueden determinar ambos potenciales, tanto el de picadura como el de protección. El potencial de picadura es el valor más alto alcanzado y el valor de potencial de protección es el que permanece constante. El segundo método utilizado para la determinación del potencial de protección es la

medida de la disminución de potencial con el tiempo a alta densidad de corriente constante. El ensayo potencioestático, se utilizó para determinar la densidad de corriente en función del tiempo a un potencial constante. El valor de potencial de picadura se determina donde la densidad de corriente se incrementa con el tiempo. [16]. Una de las gráficas obtenidas en el mencionado ensayo ha sido la siguiente.

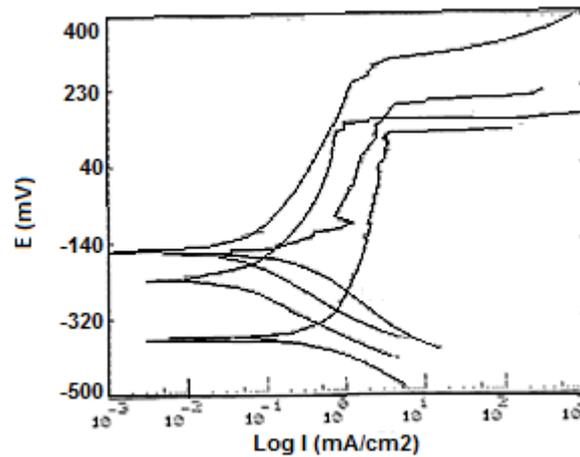


Figura 11: Curvas de polarización típicas a diferentes temperaturas.[16]

## CAPITULO 2

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el procedimiento seguido para analizar la resistencia a la corrosión de las uniones soldadas con material de aporte tubular. Se ha utilizado probetas de acero inoxidable AISI 316 L soldadas mediante el proceso GTAW con material de aporte convencional y material de aporte tubular TGX-316L. Para lograr el objetivo propuesto se ha llevado a cabo ensayos electroquímicos mediante los cuales se ha determinado el potencial de circuito abierto, se ha obtenido curvas de polarización y se ha analizado la resistencia a la corrosión. Además se ha realizado ensayos de metalografía para comparación de micro estructuras entre uniones soldadas.

Los ensayos y procedimientos descritos a continuación se han realizado siguiendo la normas respectivas de corrosión dadas por la “*National Association of Corrosion Engineers*” (NACE) y la “*American Society of Testing and Materials*” (ASTM). Las normas referentes a los ensayos de corrosión efectuados son la ASTM G3, G5-13 para preparación de muestras y ensayos potenciodinámicos, y para realizar los cálculos de tasa de corrosión, se utiliza la norma ASTM G102-89.

La figura 12 muestra un esquema del procedimiento experimental realizado.

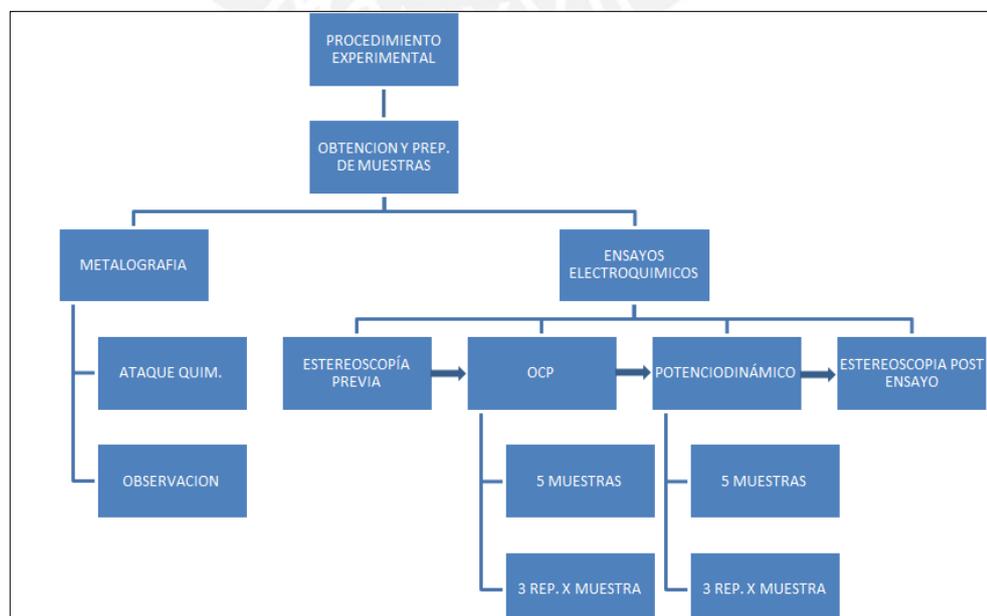


Figura 12: Esquema de procedimiento experimental

## 2.1. OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Se obtuvo siete muestras para todos los ensayos realizados, 2 de estas muestras fueron destinadas a ensayos metalográficos y 5 a ensayos electroquímicos. La obtención de muestras se realizó a partir de una plancha de 20 cm x 20 cm y de 6 mm de espesor, soldada parcialmente con material de aporte convencional y con material de aporte tubular. A continuación en la tabla se observan los parámetros de soldeo para ambas porciones de cordón de soldadura.

Parámetros	ExsaTIG 2010 Mo	TG-X 316L
Voltaje	9 a 11 V	10 a 12 V
Amperaje en raíz	85 a 90 A	90 a 97 A
Amperaje en relleno	95 a 100 A	115 a 125 A
Velocidad de soldeo	4 a 5 cm/min	3.5 a 5 cm/min
Q input	41.77 KJ/in <sup>2</sup>	46.99KJ/in <sup>2</sup>
Diámetro de varilla aporte	2.4 mm	2.4 mm
Caudal de argón	15 a 17 l/min	15 a 17 l/min

Tabla 8: Parámetros de soldeo de material de aporte convencional y tubular.

Las muestras rectangulares que se muestran en la figura 13 fueron obtenidas para la realización de los ensayos metalográficos, es por esto que abarcan todo el perfil de los cordones de soldadura, una de las muestras es de cordón de soldadura (CS) con material de aporte convencional y la otra muestra con material de aporte tubular

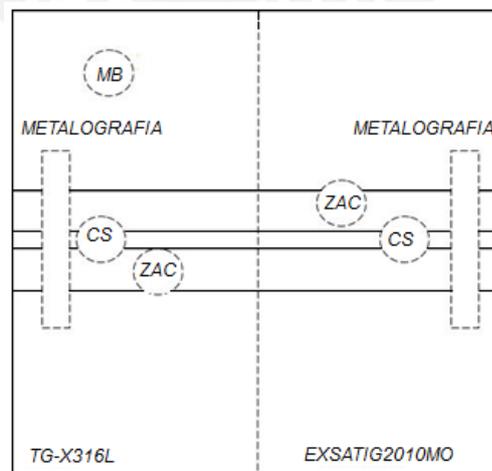


Figura 13: Esquema de obtención de muestras de una plancha de AISI316L.

Las cinco muestras circulares, se obtuvieron para ensayos electroquímicos, de cada cordón de soldadura realizado con materiales de aporte diferentes se obtuvieron muestras de zona afectada por calor, material de aporte, y una muestra de material base. Para la obtención de muestras, la plancha fue cortada y maquinada debidamente como se muestra a continuación en la figura 14.

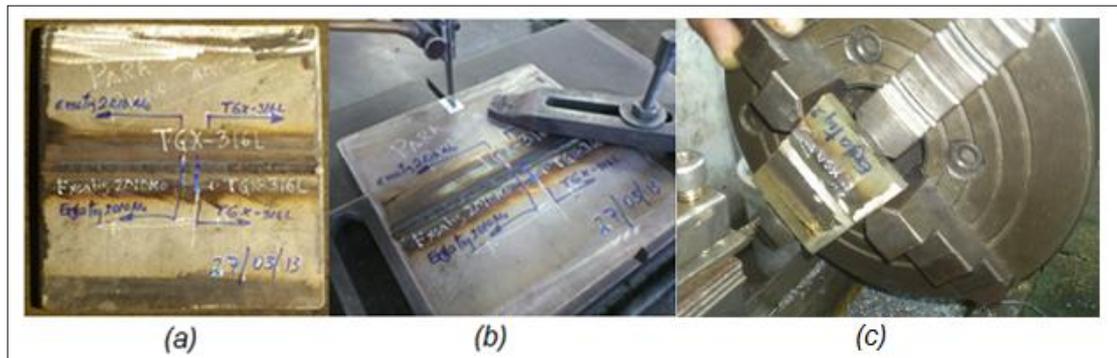


Figura 14: (a) plancha antes de maquinar. (b) corte en máquina herramienta. (c) obtención de pastillas de 15 mm de diámetro en torno.



Figura 15: Probetas para ensayos metalográficos.



Figura 16: Muestras circulares para ensayos electroquímicos.

Las cinco muestras obtenidas para análisis electroquímico se describen a continuación.

- Muestra de material base de AISI 316L
- Muestra de cordón de soldadura realizado con material de aporte convencional ExsaTIG2010Mo.
- Muestra de cordón de soldadura realizado con material de aporte tubular TG-X316L.
- Muestra de Zona afectada por el calor de cordón soldado con material de aporte convencional ExsaTIG2010Mo.
- Muestra de Zona afectada por el calor de cordón realizado con material de aporte tubular TG-X316L.

## **2.2. METALOGRAFÍA DE CORDONES DE SOLDADURA**

Se realizó el análisis metalográfico de muestras de acero AISI 316L soldadas con material de aporte convencional ExsaTIG2010Mo con protección gaseosa y también muestras del mismo acero soldado con material de aporte tubular TG-X316L sin gas de protección. Las muestras fueron debidamente enmascaradas en resina para ser desbastadas en lijas de número 150, 240, 360, 600 y 1200, luego pulidas en diamante de 3 micras y por último diamante de 1 micra para poder lograr una superficie suficientemente uniforme para observación en microscopio. Las muestras fueron atacadas con una mezcla de ácido clorhídrico, di fluoruro de amonio, agua destilada y 25 gramos de bisulfito de potasio. Esta mezcla genera color en los componentes de la microestructura generando así mayor contraste para observación.

## **2.3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS**

### **2.3.1. Tratamiento de probetas, preparación superficial:**

Se debe prestar atención en la selección y pre tratamiento de los materiales y probetas para el ensayo, en relación con la textura, superficie de la probeta tanto en el material base como en la parte de la unión soldada. Es muy importante tener esto en cuenta sobre todo si se desea ensayar la susceptibilidad del material a la corrosión. Se debe tener en cuenta también la geometría de la probeta, debe evitarse tener en ella

cualquier resquicio o, en general, cualquier defecto superficial. Por este requerimiento comúnmente se preparan las probetas puliéndolas mecánicamente con distintos grados de papel lija hasta llegar al pulido con alúmina. Con ello se logra remover entre 10 a 20 micras de la superficie del material; para lograr una superficie uniforme, se desbastó las probetas con lijas número 150, 240, 360 y 600 [14]

### **2.3.2. Dimensiones de probeta**

Es importante tomar el valor del área de la probeta así como su espesor, la probeta fue cortada en forma de una pastilla de 15 mm de diámetro y con espesor de 6 mm puesto que de este espesor era la plancha soldada original. El manual del portamuestras recomienda una dimensión de la probeta entre 16 y 15 mm.

### **2.3.3. Limpieza**

La muestra fue limpiada con alcohol previamente a los ensayos, y fue manipulada propiamente sin contacto directo con la piel.

### **2.3.4. Exposición de la probeta**

La probeta fue introducida en el portamuestras, que delimitaba un área de 1 cm<sup>2</sup> expuesta a una solución de cloruro de sodio al 5%. Es necesario controlar variables durante el experimento que influyen en los resultados del mismo. Como por ejemplo:

- pH del electrolito, que en la solución empleada era de 6.3
- Temperatura, la cual se mantuvo en su valor de ambiente

## **2.4. ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS.**

Una vez realizada la preparación respectiva de cada probeta, se procedió a sumergirla en la solución preparada dentro de una celda electroquímica, que es básicamente un recipiente de vidrio preparado especialmente para este propósito. La norma ASTM G61-86 muestra una imagen de la celda electroquímica que se ha utilizado en este ensayo, figura que se muestra a continuación.

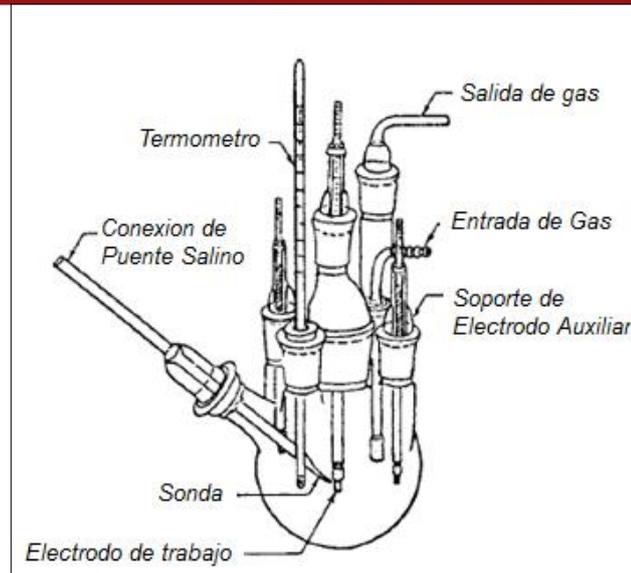


Figura 17: Diagrama esquemático de la celda electroquímica de polarización. [19].

#### 2.4.1. Descripción y parámetros

Los ensayos electroquímicos se realizaron sobre las muestras previamente cortadas como se muestra en la figura 16, estos ensayos son de tres maneras diferentes para obtención de parámetros distintos.

El primer ensayo realizado fue el ensayo de obtención del potencial de corrosión. Se montó un potenciostato de marca Gamry modelo 600 conectado a la celda electroquímica mostrada en la figura 21. Los parámetros para hallar la curva de potencial de corrosión, son una toma de datos por un intervalo de tiempo de 4 horas hasta alcanzar la estabilización de la curva de potencial en el potencial de corrosión  $E_{corr}$ . Con un periodo de muestreo de 3 segundos, el área expuesta para corrosión fue de  $1 \text{ cm}^2$ .

Posteriormente se realizó el ensayo potenciodinámico. El arreglo de la celda electroquímica a utilizar fue con dos contra electrodos de grafito de alta densidad, y un electrodo de referencia de calomel. El arreglo de instrumentos se muestra en la figura 19 (a). Y la celda electroquímica en la figura 19 (b)

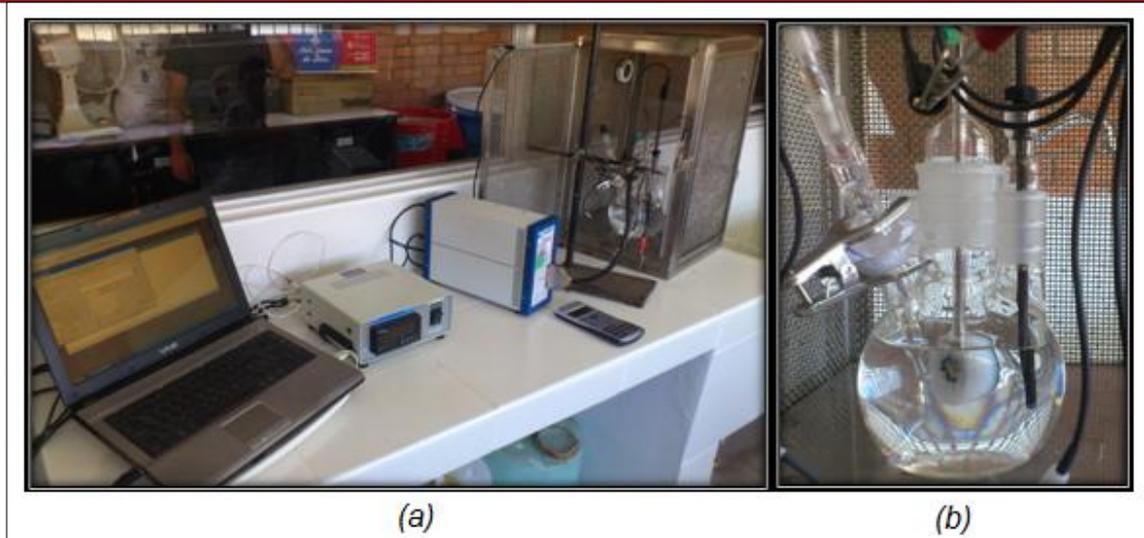


Figura 18: (a) Instrumentos para ensayos, PC, potenciostato, jaula de Faraday. (b) Celda de corrosión electroquímica conectada.

Los parámetros para este ensayo fueron los siguientes: un escaneo inicial de  $-100\text{mV}$  por debajo del potencial de corrosión previamente hallado, un límite superior de escaneo de voltaje en  $700\text{ mV}$  por encima de voltaje de corrosión a una tasa de escaneo de  $0.175\text{ mV/s}$ , valor recomendado en la norma ASTM G5-13 de  $0.16\text{ mV/s}$  con un 5% de tolerancia superior e inferior, con intervalos de muestreo de 1 segundo, la misma área de  $1\text{ cm}^2$ , densidad del acero AISI 316L de  $7,89\text{ g/cm}^3$  y un peso específico de 25.5. Todos los parámetros utilizados son valores recomendados en la norma para ensayos de corrosión ASTM G5-13 [19]

Se realizó cada uno de estos ensayos con los parámetros descritos en cada una de las 5 muestras anteriormente descritas realizándose 3 repeticiones de ensayo de potencial de circuito abierto y 3 repeticiones de ensayo potenciodinámico por cada una de ellas.

#### 2.4.2. Estereoscopia

Las mencionadas muestras fueron desbastadas en lijas de número 150, 240, 360 y 600 para lograr una superficie uniforme para el experimento, luego, fueron llevadas al estereoscopio antes y después de ser expuestas a corrosión. Cabe resaltar que todas las muestras tienen la misma apariencia superficial antes del ensayo de corrosión.

Las muestras fueron ensayadas hasta recibir una corriente de 1 mA con lo que se logran marcas de corrosión apreciables.

### **2.4.3. Curvas de ensayos electroquímicos**

#### **2.4.3.1. Curvas de obtención del potencial de corrosión**

Dado que todas las muestras fueron lijadas antes de ser sometidas a los ensayos para obtención de potencial de corrosión, al inicio del ensayo estas no cuentan con la capa protectora de cromo que se forma naturalmente en los aceros inoxidable. El potencial de corrosión es un valor importante, puesto que da a conocer el valor de voltaje bajo el cual el acero se corroe libremente sin ningún tipo de estímulo externo, dando información básica valiosa para comenzar la comparación de las muestras. El ensayo de obtención del potencial de corrosión consiste en obtener este valor de voltaje en una gráfica de potencial (abscisa) versus tiempo (ordenada) mientras se estabiliza la capa protectora en el medio en el cual se le está ensayando, que en este caso es una solución de cloruro de sodio al 5%.

#### **2.4.3.2. Curvas de barrido de voltaje en ensayo potenciodinámico**

Los aceros inoxidables analizados en esta investigación son todos de carácter pasivo, eso quiere decir que, cuando son estimulados por un constante incremento de voltaje externo, estos van formando una capa que evita que el paso de la corriente se incremente en forma lineal como lo hace el voltaje externo aplicado. Este fenómeno se le llama pasivación, y todos los metales que poseen comportamientos pasivos, tiene este tipo de reacción al barrido de voltaje externo aplicado.

El ensayo en el cual se registra la corriente en escala logarítmica conforme se realiza un barrido de voltaje, se llama ensayo potenciodinámico, y muestra la reacción de la corriente que pasa a través del metal a la aplicación de este voltaje. Este ensayo proporciona información cualitativa de calidad, puesto que se puede saber comparando gráficas, qué muestra posee corrientes de pasivación menores, qué muestras poseen potenciales de corrosión menores, por ende qué metales son más susceptibles de corrosión en el medio, entre otros parámetros mostrados más adelante.



## CAPITULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados de los ensayos realizados y un análisis de los mismos.

Se han comparado los resultados obtenidos entre las muestras y con información reportada en la literatura. Para la discusión se ha tomado en cuenta diversos factores tales como la composición química de los materiales, su microestructura, los valores de corriente de corrosión, fenómenos de pasivación, entre otros.

Otra consideración importante a tener en cuenta, es que las muestras de cordones de soldadura y zonas afectadas por el calor, fueron analizadas del lado de la raíz, puesto que este es el lado más susceptible de fallas al momento en el que se sueldan tuberías con flujo de gas de purga para protección del charco de soldadura.

Se adjuntan en la figura 20 fotografías de la inspección visual de la raíz para verificar la validez del cordón de soldadura.

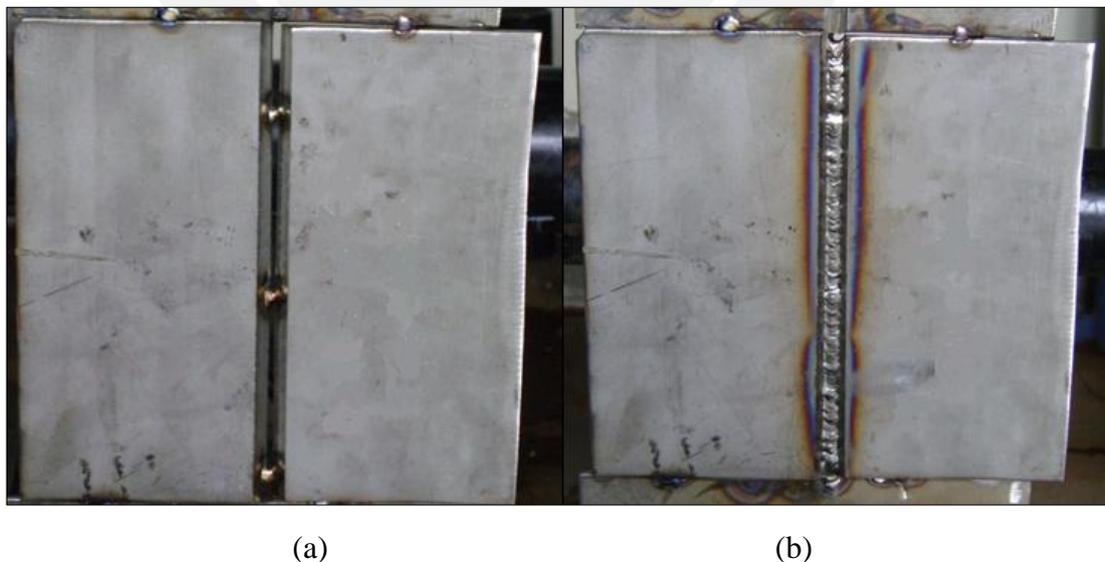


Figura 19: (a) Cupón de soldadura apuntalado. (b) inspección visual de la raíz.

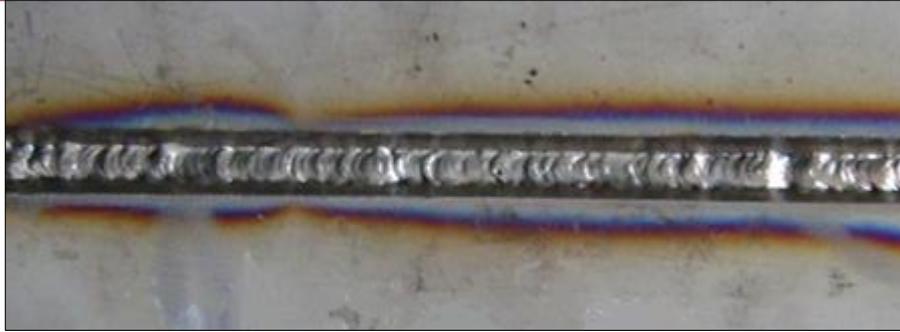


Figura 20.: Inspección visual de la raíz

### 3.1. MICROESTRUCTURA

En la figura 21 se pueden observar las fotos de la metalografía realizada a las muestras, tanto al material base como a las muestras de cordón de soldadura y la zona afectada por el calor, para las uniones realizadas con material de aporte convencional y material de aporte tubular.

Se puede claramente observar en la figura 21 (a) y (b) la microestructura austenítica del material base característica de un acero AISI316L, con granos poligonales. Además se puede apreciar también que el cordón de soldadura tiene una estructura que obedece a un crecimiento dendrítico. Esto se debe a que al momento de la solidificación del charco de soldadura la solidificación del material sigue el flujo de calor hacia el exterior del metal por los extremos de la plancha soldada. [3]

En general las muestras de soldadura con material de aporte tubular, no se presentan mayores diferencias con muestras de soldadura con material de aporte convencional. Se aprecian los mismos tipos de grano, crecimiento dendrítico en los dos tipos de cordones, ambas muestras poseen una transición sana entre el material base y el cordón, dando así la primera evidencia de que es posible obtener cordones de soldadura sanos cuando se utiliza un material de aporte tubular en lugar del convencional, eliminando la necesidad del gas.

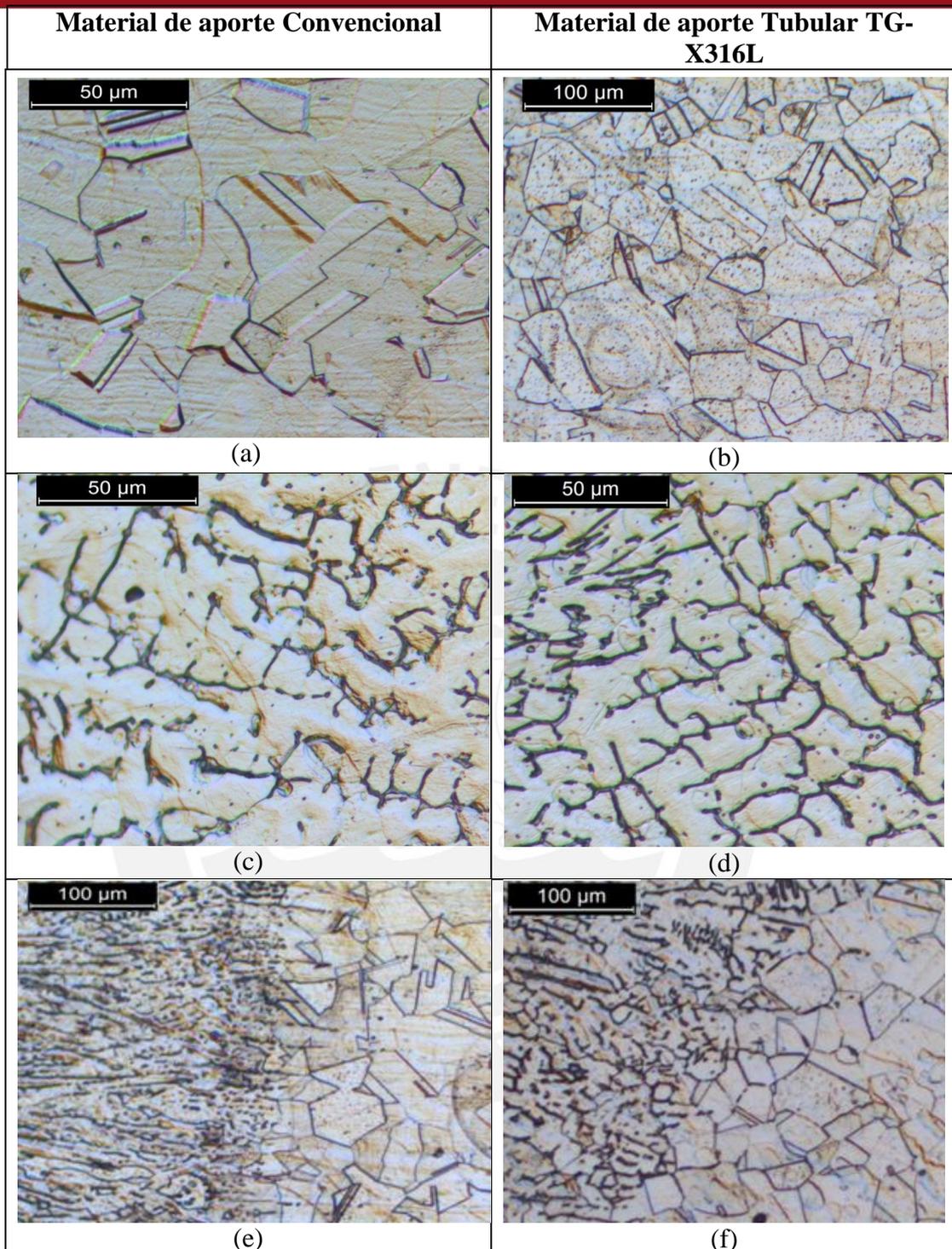


Figura 21: (a) y (b) Material base de muestras, (c) y (d) Cordón de soldadura a 500X, (e) y (f) zona afectada por el calor, transición entre material de aporte y material base a 200X.

### 3.2. ENSAYOS DE OBTENCIÓN DE POTENCIAL DE CIRCUITO ABIERTO

#### ABIERTO

Se ha realizado 3 ensayos para cada muestra de acero. Se muestra en las figuras 22 a 26 dos curvas representativas de los ensayos de obtención de potencial de circuito abierto realizado en cada muestra, posteriormente una comparación gráfica entre las muestras con sus valores promedio.

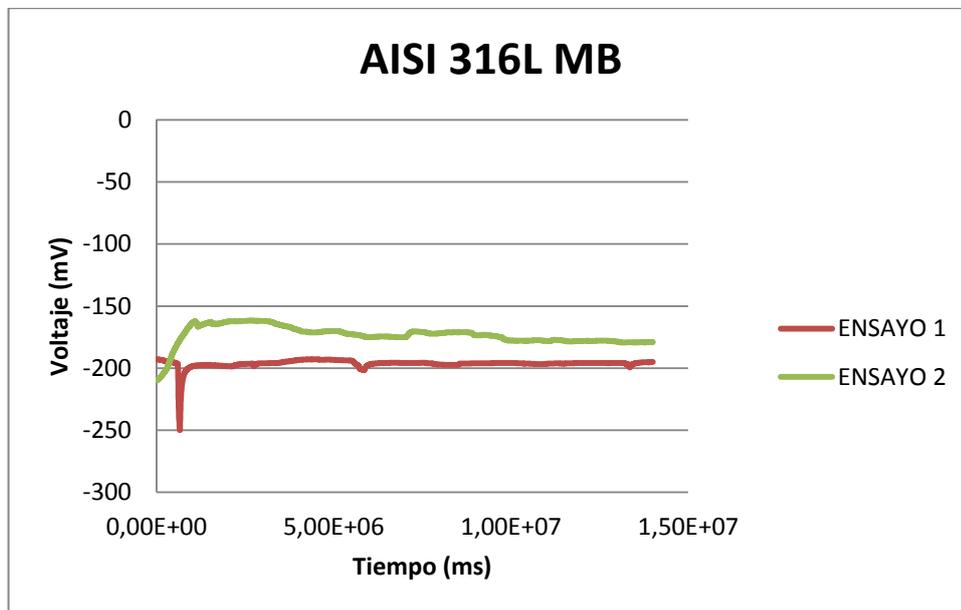


Figura 22: Gráfica de ensayos de obtención de potencial de circuito abierto para la muestra de material base en acero AISI 316 L

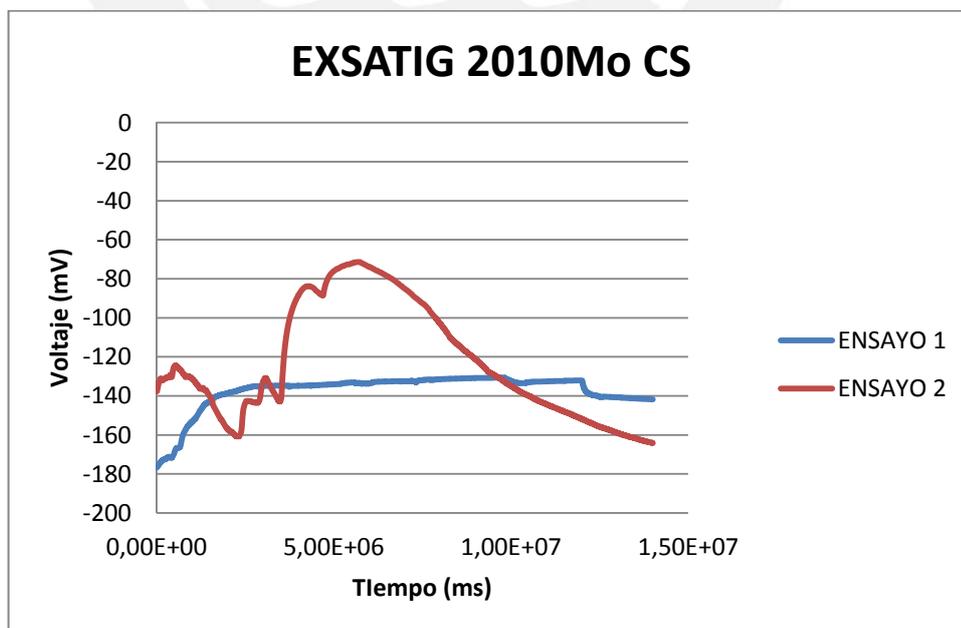


Figura 23: Ensayos de obtención de potencial de circuito abierto para la muestra de cordón de soldadura con material de aporte convencional ExsaTIG 2010Mo.

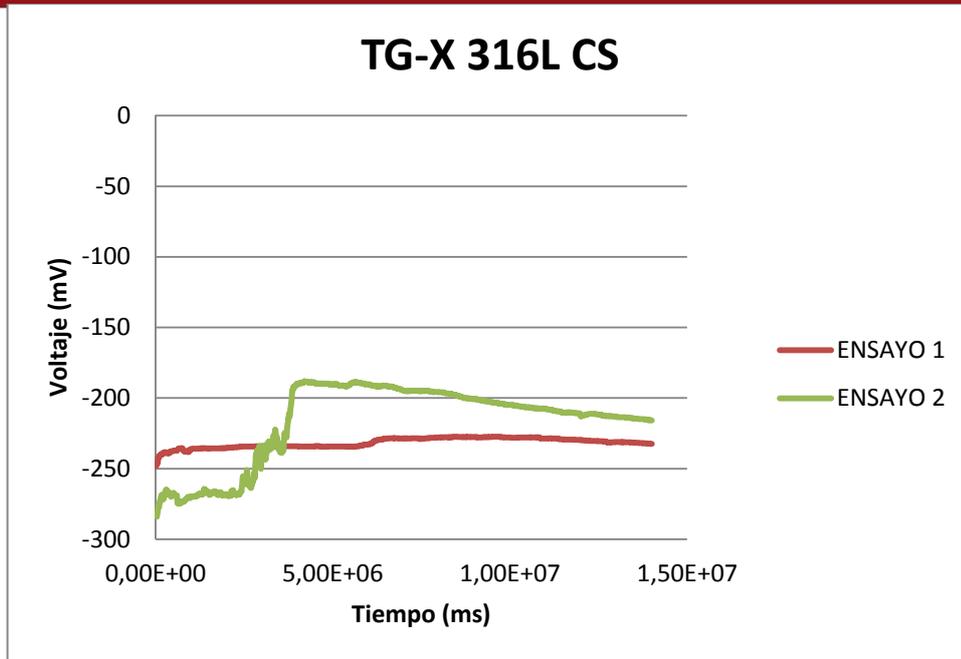


Figura 24: Ensayos de obtención de potencial de circuito abierto para la muestra de cordón de soldadura con material de aporte tubular TG-X 316L.

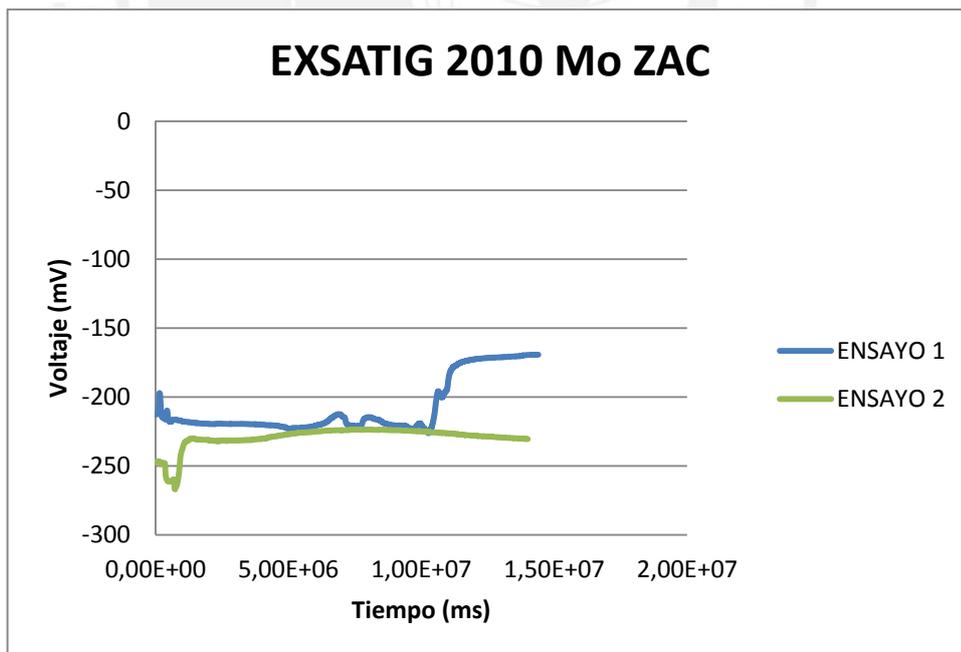


Figura 25: Ensayos de obtención de potencial de circuito abierto para la muestra de zona afectada por calor con material de aporte convencional ExsaTIG 2010 Mo

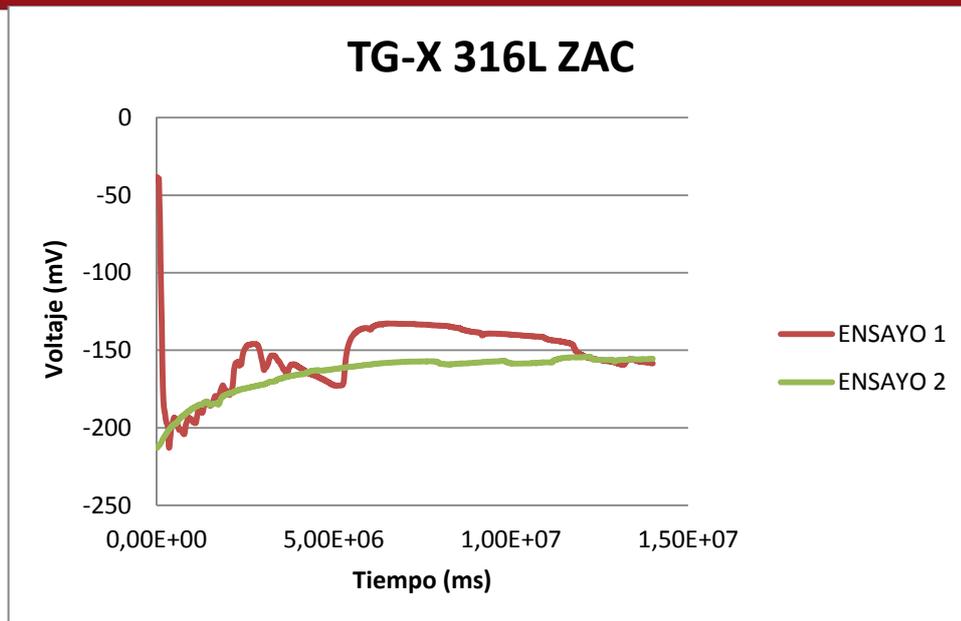


Figura 26: Ensayos de obtención de potencial de circuito abierto para la muestra de zona afectada por calor con material de aporte tubular TG-X316L.

Como se aprecia en las gráficas, existe para cada muestra una tendencia de estabilización en un valor determinado. Tomando una curva representativa de cada muestra se les puede graficar superponiéndolas en una sola gráfica como se aprecia a continuación.

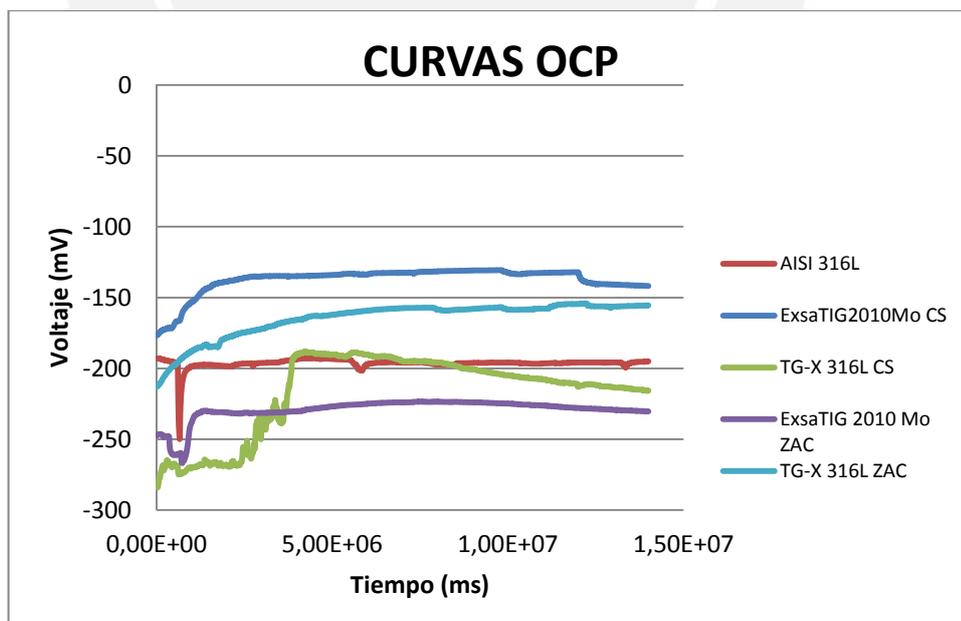


Figura 27: Gráfica de curvas de obtención de potencial de circuito abierto ver valores en Tabla 9.

Como se aprecia en la gráfica anterior los valores de estabilización son todos similares y están todos muy próximos unos de otros, en la tabla siguiente se les

ordena en forma decreciente de acuerdo a su voltaje de estabilización para poder realizar una comparación.

MUESTRA	Ecorr (mV)
ExsaTIG 2010 Mo CS	-130 mV
TG-X 316L ZAC	-155 mV
AISI 316L MB	-195 mV
TG-X 316L CS	-225 mV
ExsaTIG 2010 Mo ZAC	-240 mV

Tabla 9: Valores de Potencial de Corrosión.

Ordenando los valores anteriores en un gráfico de barras se puede observar:

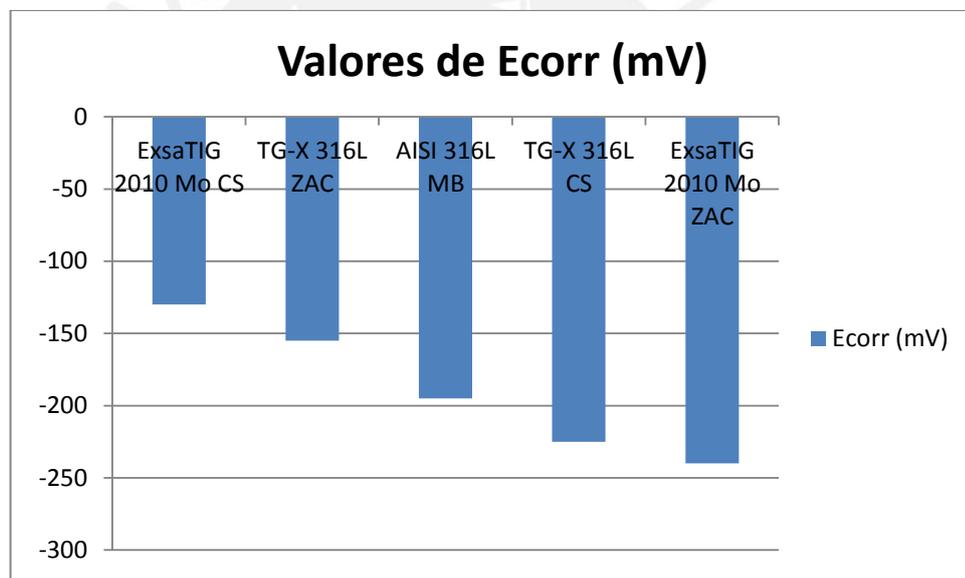


Figura 28: Gráfica de los valores negativos de potencial de corrosión ordenados de mayor a menor.

Para los valores mostrados se puede apreciar que es la muestra de soldadura convencional (ExsaTIG 2010 Mo CS) la que es menos propensa a corrosión puesto que presenta aproximadamente -130 mV de valor de potencial de corrosión, esto indica que es la muestra menos anódica entre todas, por tal motivo será menos propensa a reaccionar corroyéndose en el medio analizado.

Por otro lado, la muestra de soldadura con material de aporte tubular (TG-X 316L CS) presenta aproximadamente -225 mV, un valor de estabilización

considerablemente más negativo que la anterior muestra mencionada, e indica que esta muestra es más propensa a corroerse, cabe resaltar que, a pesar de que es el segundo valor más anódico, este valor solamente indica la propensión a corrosión, mas no velocidad o profundidad de penetración en corrosión, valores que más adelante serán mostrados, Cabe la posibilidad que esta sea la muestra más propensa a iniciar una corrosión, pero que al momento de suceder, sea la que más lentamente o menos agresivamente se corra. Asimismo, se puede apreciar que para un tiempo de 2 horas y 15 minutos aproximadamente el valor de potencial del CS del tubular es igual o mayor que el obtenido para el metal base, indicando que presenta un comportamiento igual, o inclusive mejor, respecto a la susceptibilidad a corrosión, en comparación con el metal base.

Respecto de las zonas afectadas por el calor, se puede observar que aquella correspondiente a la soldadura con material de aporte tubular posee menor valor anódico que la que corresponde a la soldadura convencional. Al tener un menor valor, la unión soldada esta menos propensa a sufrir corrosión en esta zona sensibilizada.

### **3.3. DIAGRAMAS POTENCIODINÁMICOS-ESTEREOCOPIA**

Se presentan a continuación los resultados de los ensayos potenciodinámicos. En cada gráfica mostrada, se presentan las curvas más representativas como resultados de los ensayos en cada muestra. Con las repeticiones realizadas es posible obtener información un poco más acertada, además de rangos de corriente y voltaje en los que se evidencia el comportamiento de la muestra, haciendo posible la interpretación de las curvas en forma cualitativa.

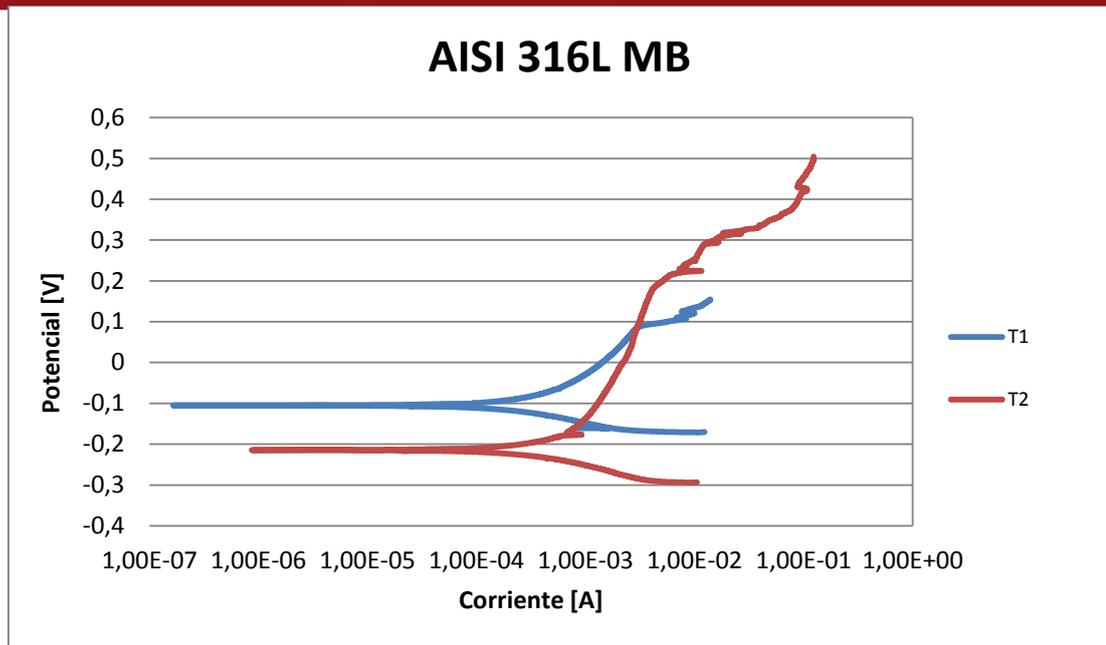


Figura 29: Gráfica de ensayos potenciodinámicos para la muestra de material base AISI 316L.

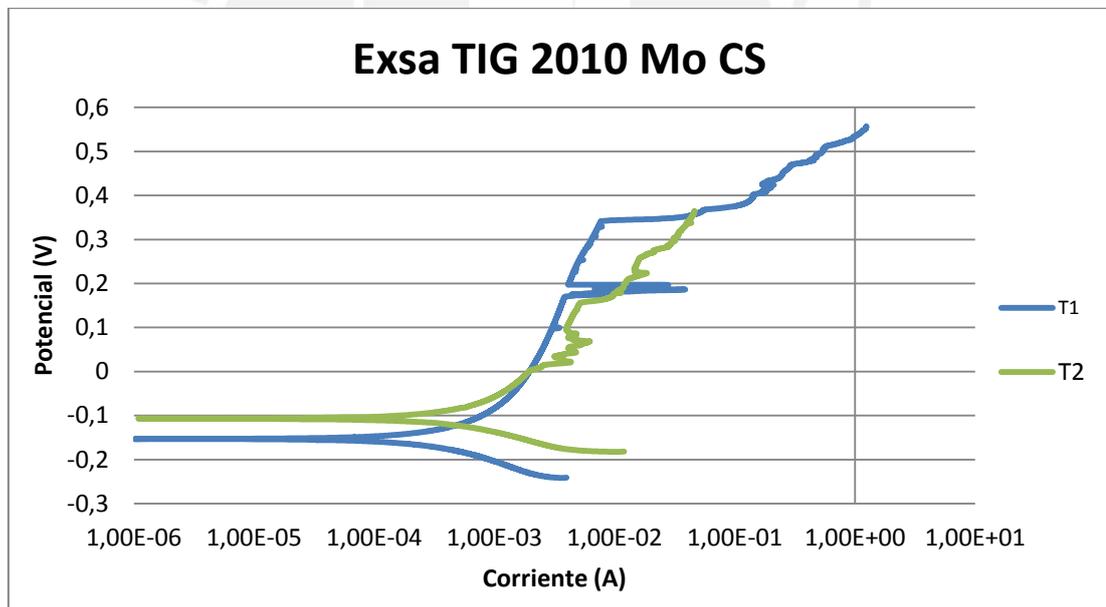


Figura 30: Gráfica de ensayos potenciodinámicos para la muestra de cordón de soldadura con material de aporte ExsaTIG 2010 Mo.

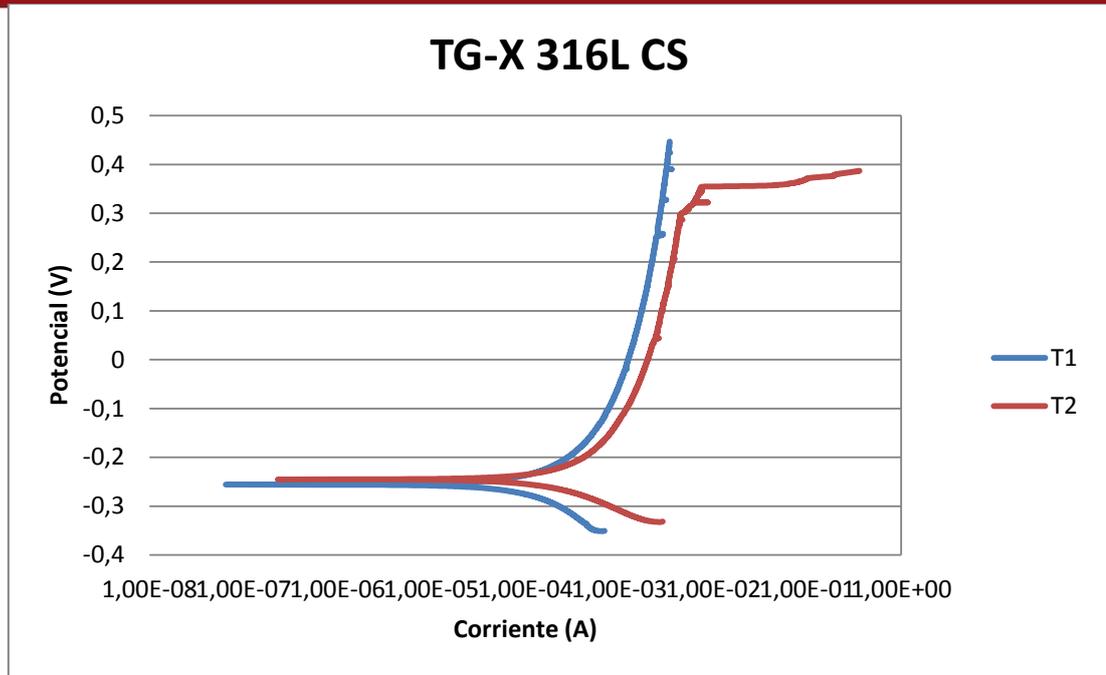


Figura 31: Gráfica de ensayos potenciodinámicos para la muestra de cordón de soldadura con material de aporte TG-X 316L

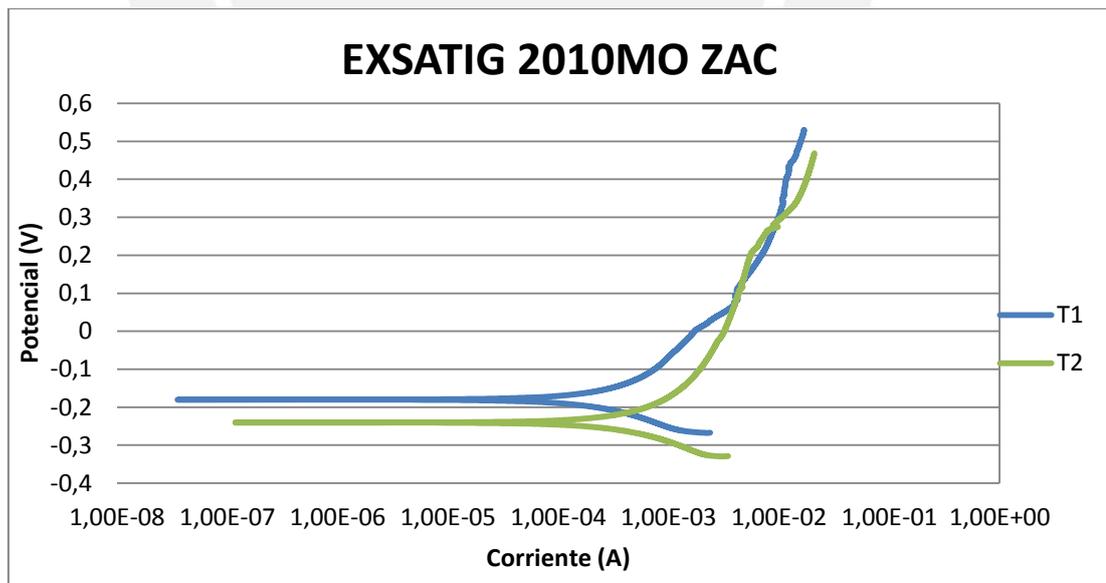


Figura 32: Gráfica de ensayos potenciodinámicos para la muestra de zona afectada por el calor con material de aporte ExsaTIG 2010 Mo.

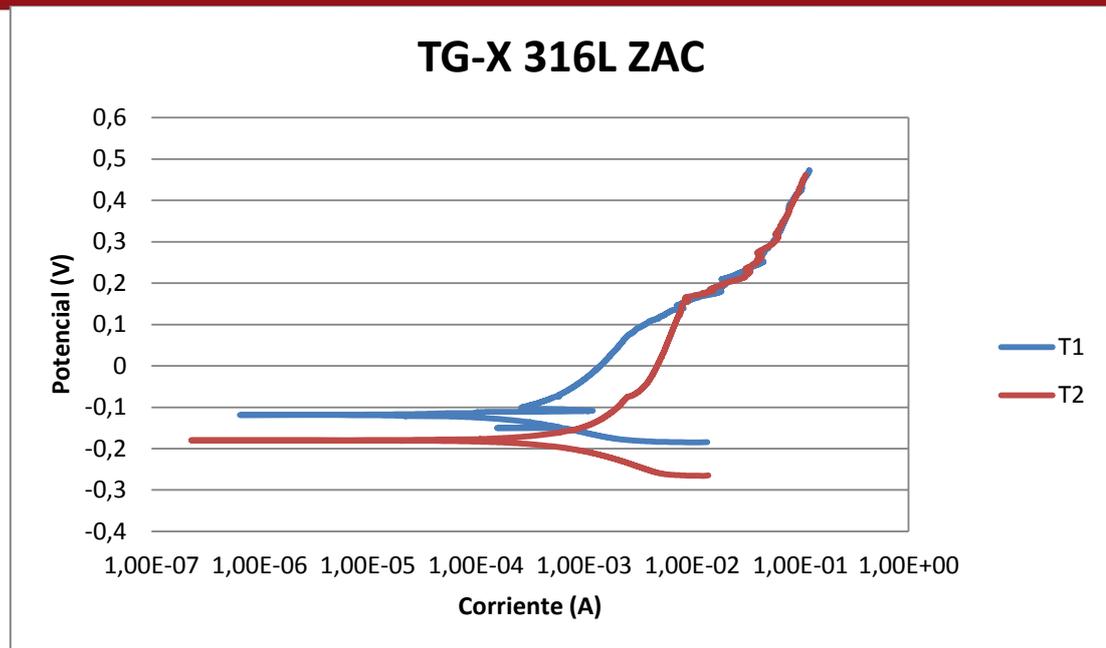


Figura 33: Gráfica de ensayos potenciodinámicos para la muestra de zona afectada por el calor con material de aporte TG-X 316L

En las gráficas mostradas se puede recabar mucha información cualitativa sobre el proceso de corrosión de cada muestra. Se puede obtener el rango de valores aproximados en los cuales cada muestra presenta la corriente de pasivación  **$I_{pass}$** , que es el rango comprendido entre el inicio de la pendiente más alta y el fin de este tramo de pendiente elevada. Comparando estos rangos de valores hallados se puede determinar cuál de las probetas ensayadas estará mejor protegida contra la corrosión en el medio estudiado puesto que mientras menor sea esta corriente, mejor será la respuesta de la superficie de la muestra cuando es sometida a condiciones de corrosión.

De cada una de las gráficas anteriormente mostradas, se ha tomado la más representativa, y se elaborado un gráfico para establecer comparaciones. El resultado se muestra en la figura 34.

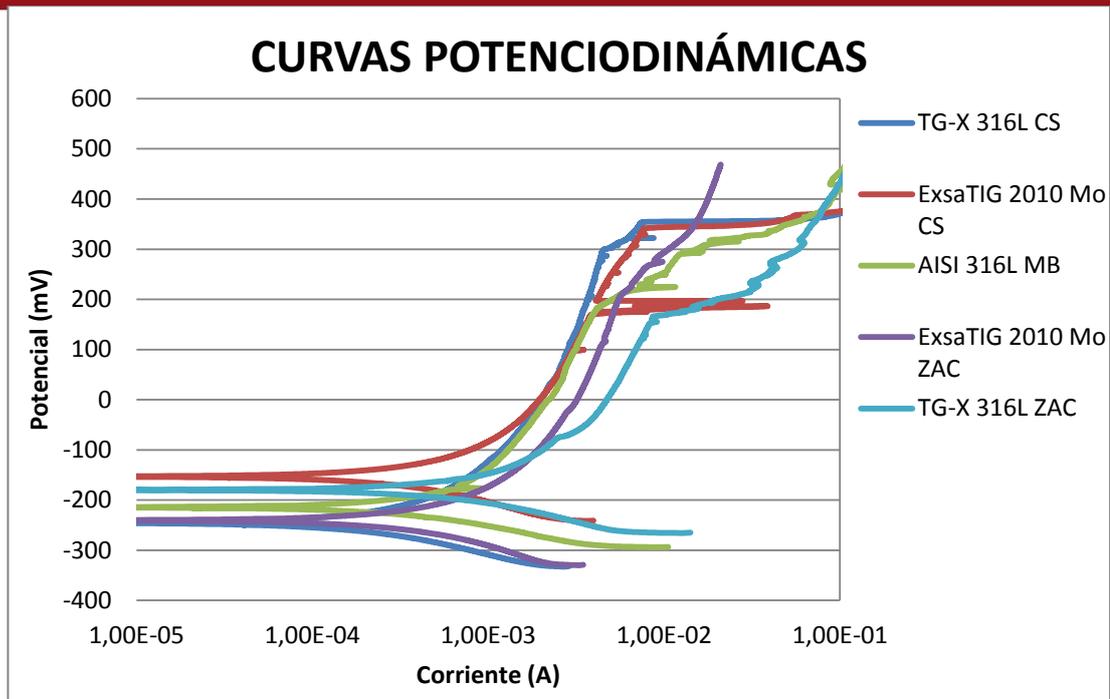


Figura 34: Gráfica de las curvas de ensayos potenciodinámicos superpuestos de las 5 muestras.

Haciendo un análisis cualitativo de las curvas potenciodinámicas, se puede apreciar un rango de pasivación. Este rango indica aproximadamente el valor de la corriente de pasivación por cada muestra; así, las curvas cuyo rango este más desplazado hacia la izquierda, presentarán una corriente de pasivación menor que aquellas que posean este rango más desplazado hacia la derecha. Además se puede observar que las curvas cuya corriente de pasivación está más desplazada hacia la izquierda, son las curvas de los dos cordones de soldadura, tanto la soldadura con material de aporte tubular, como aquella realizada con material de aporte convencional. En color verde se puede apreciar al material base, que presenta un rango de corriente de pasivación mayor al de los cordones de soldadura, pero menor que el de las zonas afectadas por el calor (ZAC) de ambas muestras. Como era de esperarse, los cordones de soldadura poseen una menor corriente de pasivación que el material base, y éste a su vez menor corriente que las zonas afectadas por el calor, esto se debe principalmente al mayor contenido de elementos aleantes presentes en las varillas de material de aporte, asegurando de esta manera que los cordones tengan igual o mayor resistencia a la corrosión que el material base. Por otro lado es de esperarse que la pasivación en la ZAC sea menor a la del metal base puesto que el calor propio de la soldadura genera

cambios microestructurales en esta zona, que a su vez influyen en la resistencia a la corrosión. Por lo tanto se puede afirmar que se cumple la siguiente relación:

$$I_{pass} \text{ Cordones Soldadura} < I_{pass} \text{ Material Base} < I_{pass} \text{ ZAC}$$

Asimismo, se puede observar en la figura 35 que el material de aporte tubular posee ligeramente una menor corriente de pasivación respecto del material de aporte convencional. Esto indica que la varilla tubular provee a la unión una protección contra la corrosión igual, e inclusive mejor, a la que se consigue con el material de aporte convencional. Respecto a las zonas afectadas por el calor, ambas muestras presentan valores mayores de corriente, lo cual puede ser posiblemente ocasionado por la sensibilización de esta zona causada por el calor.

Otra característica cualitativa importante es el intervalo de potencial para cada muestra desde el valor de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) hasta que cede la capa protectora, y comienza el rango de transpasivación. Mientras más grande sea este intervalo, y mayor sea el voltaje de la muestra tendrá mayor capacidad para tolerar condiciones más agresivas. La tabla 10 muestra los valores obtenidos de las curvas de potencial de circuito abierto y el voltaje de transpasivación, este es el rango de voltaje de pasivación que presenta cada muestra, mientras más grande sea este valor, mayor será la tolerancia de la muestra a condiciones de corrosión más agresivas.

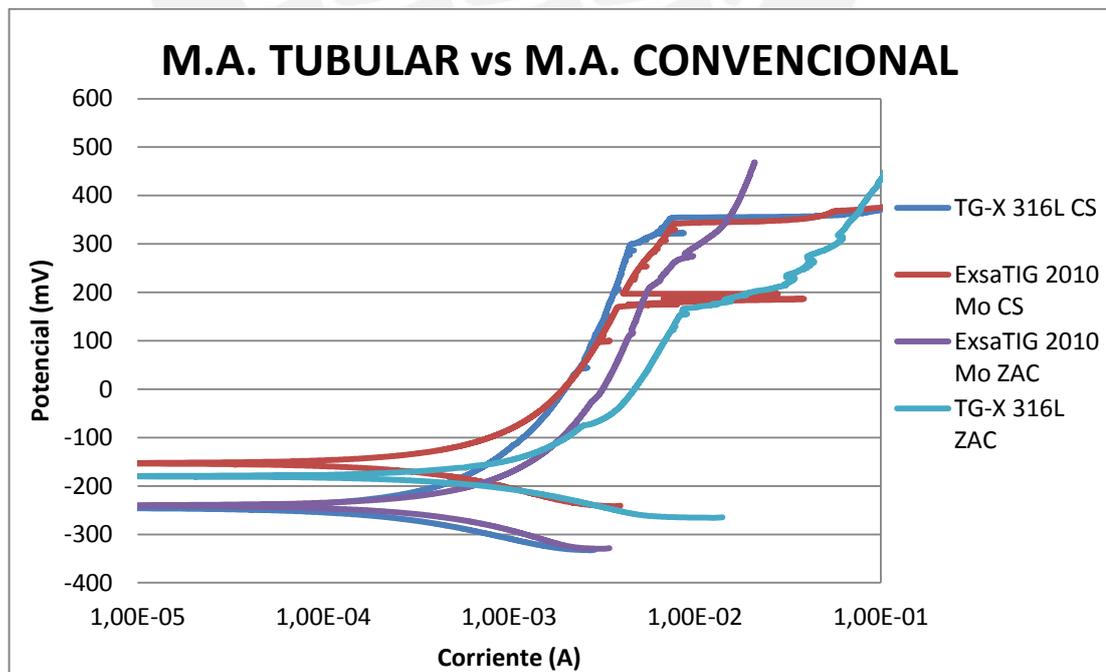


Figura 35: Gráfica de comparación de curvas potenciodinámicas de material de aporte tubular (TG-X 316L) y material de aporte convencional (ExsaTIG 2010 Mo)

MUESTRA	Ecorr (mV)	Transpasivación(mV)	D(mV)
TG-X 316L CS	-225	360	585
ExsaTIG 2010Mo CS	-130	350	480
ExsaTIG 2010Mo ZAC	-240	210	450
AISI 316L MB	-195	225	420
TG-X 316L ZAC	-155	170	325

Tabla 10: Valores de rango de voltaje de pasivacion para las 5 muestras.

Así, se tiene que el rango más grande de entre todas las muestras lo presenta la muestra de cordón de soldadura tubular, con 585 mV de diferencia entre Ecorr y transpasivación, 105mV más que la muestra de cordón convencional, lo que confirma la mayor resistencia del aporte tubular a condiciones más agresivas de corrosión.

Las probetas fueron observadas en un estereoscopio previamente a ser ensayadas en potencial de circuito abierto y ensayo potenciodinámico aplicándoles valores anódicos de corriente. La corriente aplicada en este último ensayo, en los rangos de transpasivación, provocó que se generen picaduras en la muestras, el tamaño de las picaduras obedecen a la intensidad de corriente total aplicada, apareciendo aleatoriamente a cualquier valor de densidad de corriente siempre en el rango de transpasivación de la curva potenciodinámica. En la siguiente página se pueden observar las imágenes de estereoscopia registradas a cuarenta aumentos.

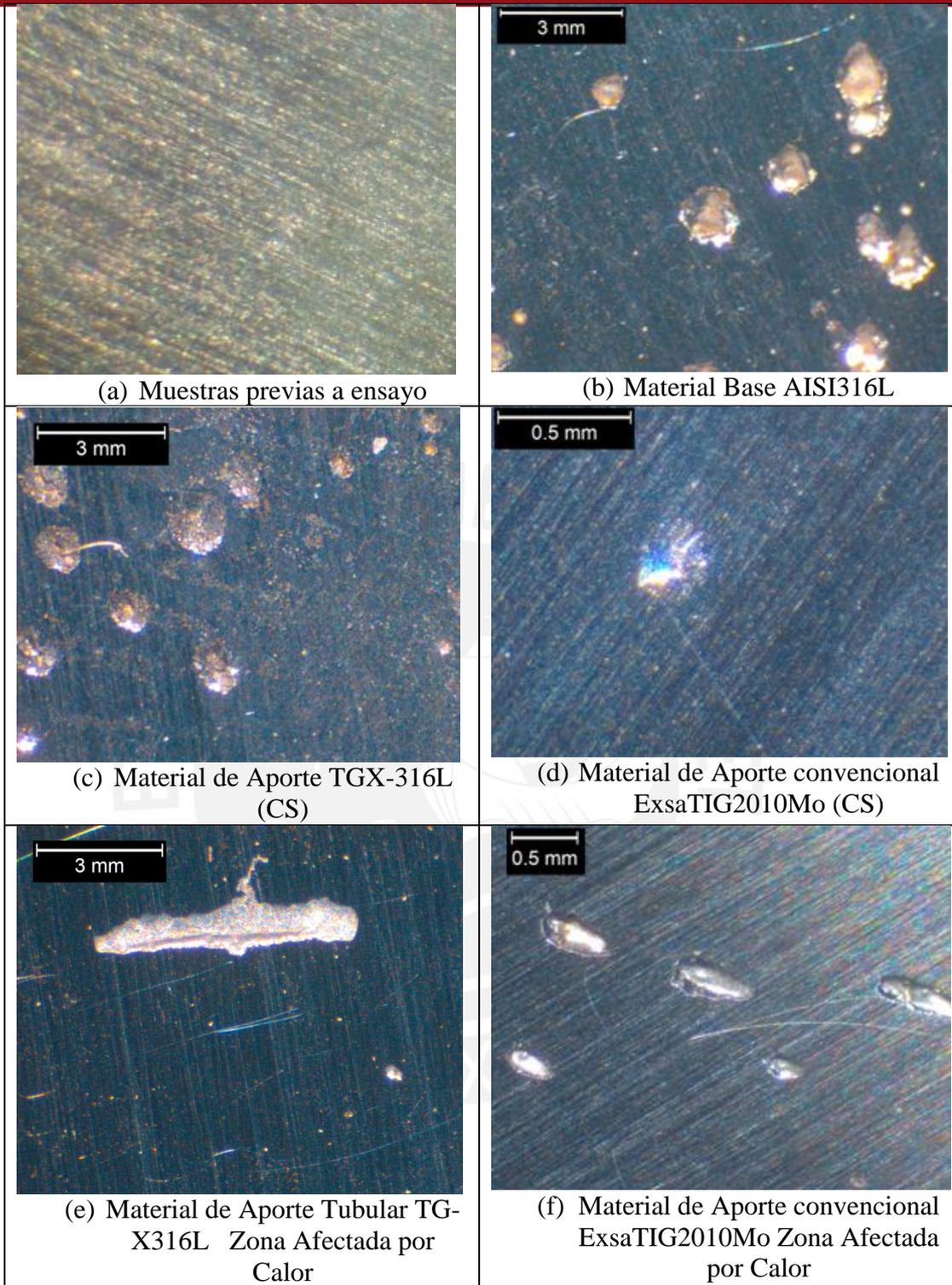


Figura 36: Imágenes de estereoscopia que muestran (a) la superficie de las muestras antes de ensayar y también (b), (c), (d), (e) y (f) las cinco muestras ensayadas a corrosión con ensayo potenciodinámico.

### 3.4. CÁLCULOS DE INTENSIDAD DE CORROSIÓN Y VELOCIDAD DE PENETRACIÓN EN CORROSIÓN.

Además de la información cualitativa que los diagramas potenciodinámicos y la estereoscopia proporcionan, también se puede obtener información cuantitativa. Esta información cuantitativa está relacionada a corrientes de corrosión, corrientes de pasivación, rangos de voltaje, entre otros. Utilizando la modelación de Tafel con el software de corrosión del mismo potencióstato, se puede determinar la corriente de corrosión haciendo la extrapolación de Tafel, todo este procedimiento es realizado por el mencionado programa. Cabe resaltar que para que se logre hacer una extrapolación con menor error, se debe tomar el rango de comportamiento lineal mayor posible.

Todas las corrientes de corrosión fueron halladas con la extrapolación de Tafel, realizada en el programa Echem Analyst de Gamry. Posteriormente se ha tomado fórmulas para hallar valores importantes de corrosión según Stansbury [21].

**Intensidad de corrosión: (IC):**

$$IC_{\left(\frac{g}{m^2 \cdot y}\right)} = 0.327 * \frac{M \cdot icorr}{m} \quad (1)$$

$$IC_{\left(\frac{mg}{cm^2 \cdot y}\right)} = 0.0327 * \frac{M \cdot icorr}{m} \quad (2)$$

**Velocidad de penetración de corrosión (VPC)**

$$VPC_{\frac{\mu m}{y}} = 0.327 * \frac{M \cdot icorr}{m \rho} \quad (3)$$

$$VPC_{\frac{mm}{y}} = 0.327 * 10^{-3} * \frac{M \cdot icorr}{m \rho} \quad (4)$$

$$VPC_{mpy} = 0.0129 * \frac{M \cdot icorr}{m \rho} \quad (5)$$

Nota: Peso atómico  $M$  debe estar en g/mol,  $m$  es el estado de oxidación o valencia, la densidad  $\rho$  en g/cm<sup>3</sup>, la densidad de corriente de corrosión ( $icorr$ ) en mA/m<sup>2</sup>,  $mpy$

significa milésimas de pulgada al año. Tener en cuenta que  $i_{corr} = I_{corr}/A$  Para aleaciones usar fracciones de peso atómico en los valores de  $M$ ,  $m$  y  $\rho$  [21]. Teniendo en cuenta la información de la norma ASTM G102 tenemos la ecuación siguiente.

$$EW = M/m \quad [22]$$

Donde  $EW$  es peso equivalente,  $M$  es masa atómica y  $m$  la valencia, tal como lo indica E.E Stansbury. En la norma ASTM G102-89 (2010), se brinda información sobre pesos equivalentes de aleaciones conocidas, entre ellas se brinda el peso equivalente del acero AISI 316L el cual tiene un valor de  **$EW= 25.5$**

Por lo tanto se puede hallar valores de intensidad de corrosión y velocidad de penetración de corrosión para poder compararlos entre sí.

Se muestra en la Figuras 37 el ajuste de Tafel realizado a las curvas potenciodinámicas para obtener el valor de densidad de corriente de corrosión. Para luego utilizar este dato para obtener los valores de Intensidad de corriente de corrosión y Velocidad de penetración de corrosión. Este ajuste se ha realizado a cada uno de los tres ensayos realizados a cada muestra, una vez obtenido el valor de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) se ha tomado los valores más cercanos entre sí, y se les ha promediado, con la finalidad de establecer un valor representativo de cada muestra.

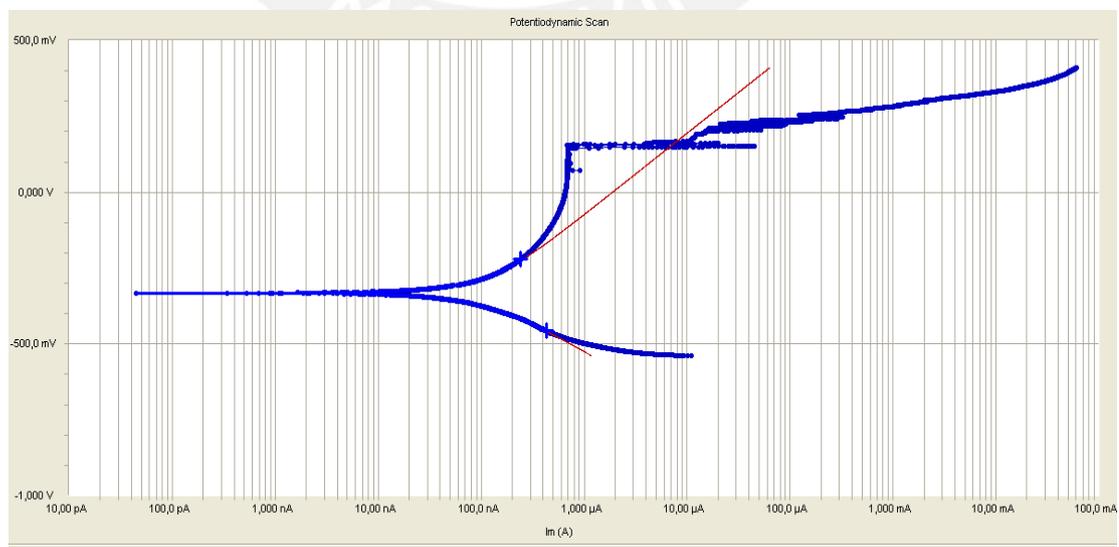


Figura 37: Ajuste de Tafel visto en líneas rojas sobre gráfica azul en programa Echem Analyst

Valores de densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) obtenidos mediante software se muestran en la Tabla 11

MUESTRA	CORRIENTES DE CORROSION (nA)		
	T1	T2	PROMEDIO
AISI 316L MB	465,8	490	477,9
TG-X316L CS	302	149,2	225,6
ExsaTIG2010Mo CS	200	297,6	248,8
TG-X316L ZAC	368,8	603,4	486,1
ExsaTIG2010Mo ZAC	620,7	722,9	671,8

Tabla 11: Valores de Corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) en nano Amperios hallados mediante el software Echem Analyst

Para poder hallar VPC e IC necesitamos datos adicionales tales como la densidad de las muestras, la cual, para efectos prácticos se asumirán estos datos todos iguales a los del acero AISI 316L  $\rho = 7.96 \text{ g/cm}^3$ .

El área de ensayo utilizada es de  $1 \text{ cm}^2$  por lo tanto: hallando el valor de  $I_{corr}$  según, las unidades necesitadas se tiene  $477,9 \text{ nA/cm}^2$ , que se necesita convertir a  $\text{mA/m}^2$

$$477,9 \text{ nA/cm}^2 = 4,779 \text{ mA/m}^2$$

Hallando valores de IC, y VPC, se calcula el valor para las cinco muestras.

Reemplazando los valores en las fórmulas (2) y (3) se tiene:

$$IC_{\text{AISI316L MB}} = 0.0327 \text{ EW} * i_{corr} = 0.0327 \cdot 25.5 \cdot 4,779 = 3,984 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2\text{y}}$$

$$IC_{\text{TG-X316L CS}} = 0.0327 \text{ EW} * i_{corr} = 0.0327 \cdot 25.5 \cdot 2,256 = 1,881 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2\text{y}}$$

$$IC_{\text{ExsaTIG2010Mo CS}} = 0.0327 \text{ EW} * i_{corr} = 0.0327 \cdot 25.5 \cdot 2,488 = 2,075 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2\text{y}}$$

$$IC_{\text{TG-X316L ZAC}} = 0.0327 \text{ EW} * i_{corr} = 0.0327 \cdot 25.5 \cdot 4,861 = 4,053 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2\text{y}}$$

$$IC_{ExsaTIG2010Mo ZAC} = 0.0327 EW * icorr = 0.0327 25.5 6,718$$

$$= 5,602 \frac{mg}{cm^2y}$$

$$VPC_{AISI316L} = 0.327 * \frac{EW * icorr}{\rho} = 0.327 * \frac{25.5 * 4,779}{7.96} = 5,006 \frac{\mu m}{y}$$

$$VPC_{TG-X316L CS} = 0.327 * \frac{EW * icorr}{\rho} = 0.327 * \frac{25.5 * 2,256}{7.96} = 2,363 \frac{\mu m}{y}$$

$$VPC_{ExsaTIG2010Mo CS} = 0.327 * \frac{EW * icorr}{\rho} = 0.327 * \frac{25.5 * 2,488}{7.96} = 2,606 \frac{\mu m}{y}$$

$$VPC_{TG-X316L ZAC} = 0.327 * \frac{EW * icorr}{\rho} = 0.327 * \frac{25.5 * 4,861}{7.96} = 5,092 \frac{\mu m}{y}$$

$$VPC_{ExsaTIG2010MoZAC} = 0.327 * \frac{EW * icorr}{\rho} = 0.327 * \frac{25.5 * 6,718}{7.96} = 7,037 \frac{\mu m}{y}$$

El valor de intensidad de corrosión (IC) nos da a entender cuanta cantidad de masa de material será removida por unidad de área en un tiempo determinado a causa de la oxidación del metal en el medio estudiado, y la velocidad de penetración de corrosión (VPC), da a entender cuán rápido penetrará la corrosión en el material en cuestión

De la misma manera se ha realizado el cálculo de los valores de IC y VPC para las demás muestras, los resultados se muestran en la Tabla 12

MUESTRA	I corr (mA/m <sup>2</sup> )	IC (mg/cm <sup>2</sup> *y)	VPC (um/y)
<b>AISI 316L MB</b>	4,779	3,985	5,006
<b>TG-X316L CS</b>	2,256	1,881	2,363
<b>ExsaTIG2010Mo CS</b>	2,488	2,075	2,606
<b>TG-X316L ZAC</b>	4,861	4,053	5,092
<b>ExsaTIG2010Mo ZAC</b>	6,718	5,602	7,037

Tabla 12: Valores de Intensidad de Corrosión y Velocidad de penetración en Corrosión de las 5 muestras.

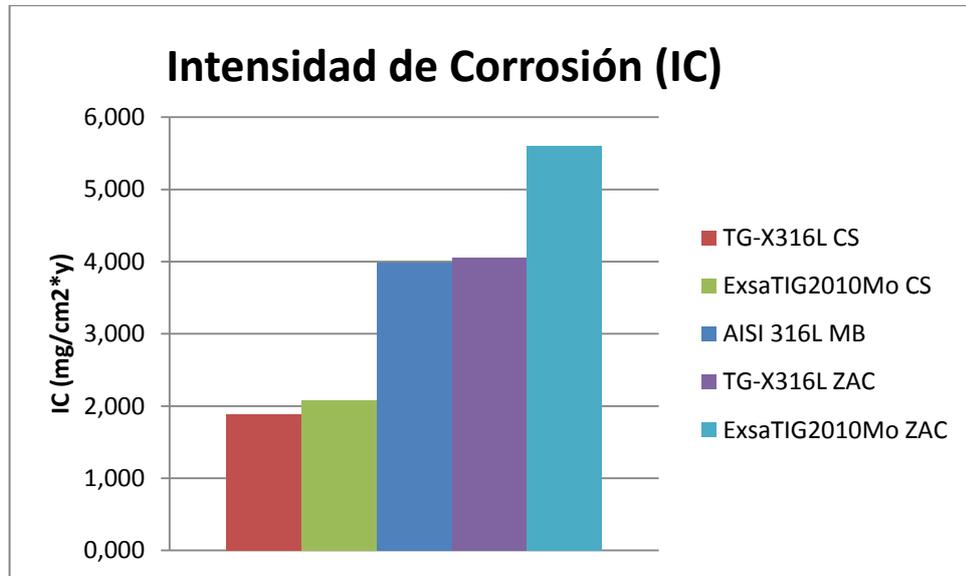


Figura 38: Gráfica de valores de Intensidad de corrosión ordenados de menor a mayor.

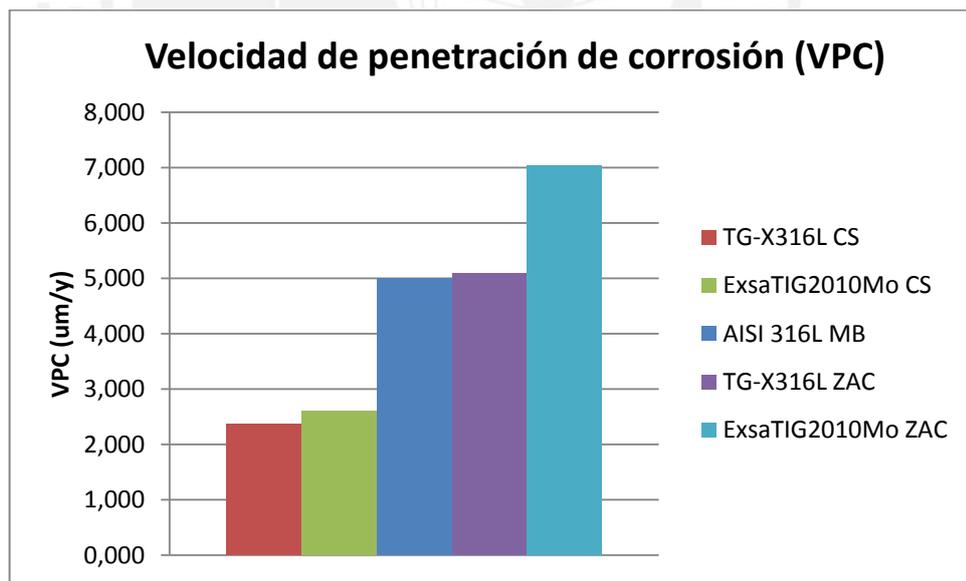


Figura 39: Gráfica de valores de velocidad de penetración de corrosión ordenados de menor a mayor.

En este sentido y teniendo en cuenta los valores de los cuadros, se obtiene los resultados esperados, es el material base el que sufre valores de corrosión intermedios entre las muestras de cordones de soldadura y las zonas afectadas por el calor. Comparando valores de IC y VPC de los cordones de soldadura, se puede

apreciar según el resultado que el material de aporte tubular posee ligeramente menores índices de corrosión con respecto al material de aporte convencional, hecho que reafirma la hipótesis inicial sobre este material de aporte. Respecto de las zonas afectadas por el calor es la ZAC convencional la que sufriría mayor valor de intensidad de corrosión así como velocidad de penetración de corrosión. Tal y como se esperaba, habiendo realizado la soldadura de ambas muestras sin gas de purga, el material de aporte tubular cuenta con una mejor capacidad para proteger la ZAC del lado de la raíz, en el momento más crítico del proceso de soldadura, esto se muestra en los valores de intensidad de corrosión IC y velocidad de penetración en corrosión.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, si bien es cierto el cordón de soldadura realizado con material de aporte tubular era el más propenso de corroerse por ser de carácter más anódico, es en realidad la muestra que menores índices de corrosión presenta, esto es debido a la cantidad de elementos aleantes, que contribuyen a su mayor resistencia, tanto mecánica como anticorrosiva.

En general, una vez más se observa que la muestra de material de aporte Tubular TG-X316L tiene propiedades similares o mejores incluso que la muestra de material de aporte convencional.

### 3.5. CONSIDERACIONES ADICIONALES

Se ha tomado para efectos de discusión y comparación de resultados, los ensayos de corrosión por inmersión realizados por el Ing. Smith Sierra Ramos en su trabajo de tesis para obtención del grado de magister *“Influencia del Aporte Tubular TG-X 316L En la Resistencia a la Corrosión por Picadura en Uniones de Acero Inoxidable 316L Soldadas por El Proceso GTAW”*, entre muestras de cordón de soldadura convencional (ExsaTIG 2010Mo) y muestras de cordón de soldadura tubular (TG-X 316L)

En estos ensayos se ha determinado la pérdida de masa de las muestras progresivamente, determinando así cuál de las dos muestras tiene mejor resistencia a la corrosión. El contrastar los resultados de los ensayos de inmersión con los resultados de los ensayos potenciodinámicos y ensayos de obtención de potencial de circuito abierto, refuerza la hipótesis sobre la superioridad de resistencia a la

corrosión de la muestra de soldadura con material de aporte tubular por sobre las propiedades del material de aporte convencional en las condiciones soldadas.

Respecto de los parámetros de ensayos, las muestras de soldadura fueron sumergidas en una solución de 100 gramos de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Tricloruro Férrico Hexahidratado) y 900mL de agua destilada [23].

Las muestras fueron sumergidas durante 72 horas para poder registrar una pérdida de peso significativa, registrando el peso de cada muestra cada hora durante las primeras 9 horas de trabajo, dejando transcurrir luego 16 horas, para continuar con las mediciones y así se ha repetido el mismo ciclo hasta cumplir las 72 horas de muestreo. Una vez cumplido este procedimiento se registró el horario de muestreo, horas acumuladas de inmersión, Peso inicial al comenzar cada hora, peso final después de cada hora, variación de peso por cada hora y porcentaje de pérdida de peso por cada hora transcurrida.

De esta manera se registraron valores para la muestra de cordón de soldadura con material de aporte convencional y de la misma manera para la muestra con material de aporte tubular. Para el cordón de soldadura tubular se registraron los siguientes datos.

hora muestreo	Hacum	$W_{im}$ (g)	$W_{fm}$ (g)	$W$ (g)	Tiempo Inmersión	$W_{perdida}$ (g)	Perdida peso (%)
-	-	-	-	-	-	-	-
9-10 am	1	81,9768	81,969	0,0083	1	0,0083	0,010124816
10-11 am	2	81,9685	81,96	0,0087	2	0,0087	0,010613833
11-12 am	3	81,9598	81,947	0,0129	3	0,0129	0,015739423
12-1 pm	4	81,9469	81,929	0,0177	4	0,0177	0,021599353
1-2 pm	5	81,9292	81,909	0,0205	5	0,0205	0,025021604
2-3 pm	6	81,9087	81,887	0,0222	6	0,0222	0,027103348
3-4 pm	7	81,8865	81,86	0,0263	7	0,0263	0,032117626
4-5 pm	8	81,8602	81,833	0,0272	8	0,0272	0,03322738
5-6 pm	9	81,833	81,805	0,0279	9	0,0279	0,034093825
9-10 am	25	81,8051	81,762	0,0436	25	0,0436	0,053297411
10-11 am	26	81,7615	81,717	0,0442	26	0,0442	0,054059674
11-12 am	27	81,7173	81,673	0,0441	27	0,0441	0,053966541
12-1 pm	28	81,6732	81,628	0,0451	28	0,0451	0,055220072
1-2 pm	29	81,6281	81,582	0,0457	29	0,0457	0,055985623
2-3 pm	30	81,5824	81,536	0,0464	30	0,0464	0,056875012

3-4 pm	31	81,536	81,489	0,0471	31	0,0471	0,057765895
4-5 pm	32	81,4889	81,442	0,0469	32	0,0469	0,057553851
5-6 pm	33	81,442	81,393	0,0489	33	0,0489	0,06004273
9-10 am	49	81,3931	81,298	0,0952	49	0,0952	0,116963232
10-11 am	50	81,2979	81,2	0,0976	50	0,0976	0,120052301
11-12 am	51	81,2003	81,097	0,1029	51	0,1029	0,12672367
12-1 pm	52	81,0974	80,993	0,1041	52	0,1041	0,128364165
1-2 pm	53	80,9933	80,888	0,1053	53	0,1053	0,130010754
2-3 pm	54	80,888	80,782	0,1062	54	0,1062	0,131292652
3-4 pm	55	80,7818	80,673	0,1084	55	0,1084	0,134188642
4-5 pm	56	80,6734	80,563	0,1103	56	0,1103	0,136724125
5-6 pm	57	80,5631	80,449	0,1138	57	0,1138	0,141255736
<b>09:00 a.m.</b>	<b>72</b>	<b>80,4493</b>	<b>80,32</b>	<b>0,1294</b>	<b>72</b>	<b>0,1294</b>	<b>0,160846645</b>

Tabla 13: Pérdida de peso registrada en el material de aporte convencional mediante ensayo de inmersión.

De la misma manera, para el material de aporte convencional se registraron los siguientes datos.

Hora muestro	Hacum	W <sub>im</sub> (g)	W <sub>fm</sub> (g)	W (g)	Tiempo Inmersión	Wperdida (g)	Pérdida peso (%)
-	0	82,064	-				
9-10 am	1	82,064	82,0543	0,0096	1	0,0096	0,0116982
10-11 am	2	82,054	82,0445	0,0098	2	0,0098	0,01194331
11-12 am	3	82,045	82,0298	0,0147	3	0,0147	0,01791711
12-1 pm	4	82,03	82,0102	0,0196	4	0,0196	0,02389376
1-2 pm	5	82,01	81,9869	0,0233	5	0,0233	0,0284111
2-3 pm	6	81,987	81,9623	0,0246	6	0,0246	0,03000479
3-4 pm	7	81,962	81,9358	0,0265	7	0,0265	0,03233194
4-5 pm	8	81,936	81,9089	0,0269	8	0,0269	0,03283058
5-6 pm	9	81,909	81,8813	0,0276	9	0,0276	0,03369597
9-10 am	25	81,358	81,3134	0,0441	25	0,0441	0,05420521
10-11 am	26	81,313	81,2689	0,0445	26	0,0445	0,05472653
11-12 am	27	81,269	81,2243	0,0446	27	0,0446	0,05487954
12-1 pm	28	81,224	81,1794	0,0449	28	0,0449	0,05527902
1-2 pm	29	81,179	81,1342	0,0452	29	0,0452	0,05567915
2-3 pm	30	81,134	81,0881	0,0461	30	0,0461	0,05681944
3-4 pm	31	81,088	81,0413	0,0468	31	0,0468	0,057715
4-5 pm	32	81,041	80,994	0,0473	32	0,0473	0,0583653
5-6 pm	33	80,994	80,9454	0,0486	33	0,0486	0,06000444
9-10 am	49	79,889	79,7939	0,0947	49	0,0947	0,11854007

10-11 am	50	79,794	79,6934	0,1005	50	0,1005	0,12594948
11-12 am	51	79,693	79,5896	0,1038	51	0,1038	0,13024918
12-1 pm	52	79,59	79,486	0,1036	52	0,1036	0,13016776
1-2 pm	53	79,486	79,3817	0,1043	53	0,1043	0,13121808
2-3 pm	54	79,382	79,2762	0,1055	54	0,1055	0,13290217
3-4 pm	55	79,276	79,1701	0,1061	55	0,1061	0,13383588
4-5 pm	56	79,17	79,0626	0,1075	56	0,1075	0,13578358
5-6 pm	57	79,063	78,9553	0,1073	57	0,1073	0,13571524
#####	<b>72</b>	<b>77,277</b>	<b>77,1466</b>	<b>0,1303</b>	<b>72</b>	<b>0,1303</b>	<b>0,16861442</b>

Tabla 14: Pérdida de peso registrada en el material de aporte tubular mediante ensayo de inmersión.

Graficando estos resultados en una tabla de porcentaje de pérdida de masa versus tiempo y contrastando las curvas de pérdida de porcentaje de peso, se obtuvo la gráfica de la figura 39.

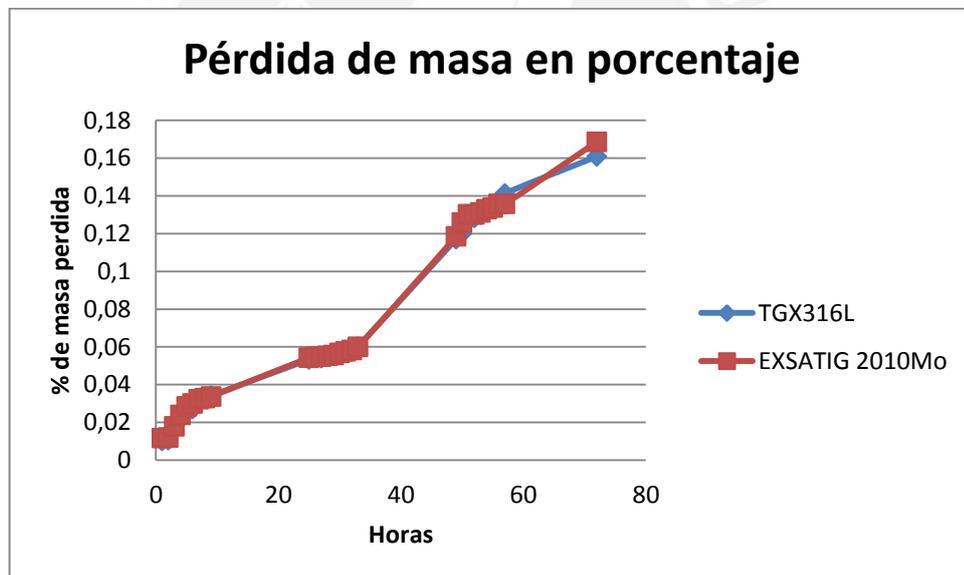


Figura 40: Pérdida de masa en porcentaje de las muestras de cordón de soldadura convencional (rojo) y muestra de cordón de soldadura tubular (azul)

Este ensayo de inmersión es de mucha importancia pues valida y refuerza el resultado de los ensayos potenciodinámicos y ensayos de obtención de potencial de circuito abierto, se observa que son por lo menos iguales. En el medio y condiciones ensayadas el material de aporte tubular presenta prácticamente la misma pérdida de peso en porcentaje, mostrando así sus buenas propiedades anticorrosivas. .

### 3.6. CONCLUSIONES:

- ✓ Se obtuvieron uniones soldadas de acero inoxidable AISI 316L mediante el proceso GTAW empleando un material de aporte tubular, con resultados similares a los obtenidos con material de aporte convencional (varilla sólida).
- ✓ No existe ningún tipo de modificación o efecto perjudicial a nivel microestructural cuando se utiliza el material de aporte tubular, por lo tanto se puede decir que en este aspecto que el fundente que está en el centro del material de aporte cumple satisfactoriamente con su función protectora al momento en que se tiene un charco de soldadura líquido y vulnerable a contaminaciones, posibilitando así la obtención de un cordón de soldadura sano a pesar de no utilizar el gas de protección.
- ✓ El análisis de los ensayos potenciodinámicos indica que el material de aporte tubular proporciona una mejor protección ante la corrosión en comparación con el aporte convencional. El valor de  $I_{corr} = 2,256 \text{ mA/m}^2$  correspondiente al material de aporte tubular es ligeramente inferior al valor de  $I_{corr} = 2,488 \text{ mA/m}^2$  por ello es posible afirmar que la soldadura con material de aporte tubular posee ligeramente mejores propiedades de pasivación que el material de aporte convencional, ambas también ligeramente mejores que el material base cuyo valor de  $I_{corr} = 4,779 \text{ mA/m}^2$ , debido básicamente a la mayor cantidad de elementos aleantes.
- ✓ Los cálculos realizados sobre velocidad de corrosión e intensidad de penetración de corrosión validan la hipótesis y permiten afirmar que el material de aporte tubular confiere propiedades similares o mejores a las del aporte convencional, tomando en cuenta los valores presentados en la tabla 12, el material de aporte tubular (TG-X 316L CS) posee el valor de  $1,881 \text{ mg/cm}^2\cdot\text{y}$  de intensidad de corrosión y  $2,363 \text{ um/y}$  de velocidad de penetración de corrosión, contra los valores de la muestra de cordón de soldadura convencional (ExsaTIG 2010Mo CS) correspondientes  $2,075 \text{ mg/cm}^2\cdot\text{y}$ , y  $2,606 \text{ um/y}$  de intensidad de corrosión y velocidad de penetración de corrosión, respectivamente.

- ✓ Al comparar los resultados de la presente tesis con resultados de un estudio similar, en el que se emplearon ensayos de inmersión, se puede corroborar que el cordón de soldadura con material de aporte tubular es el que presenta mejor resistencia a la corrosión, registrándose pérdidas de masa muy similares, 0.161 % en 72 horas para el material de aporte convencional contra 0.168% en 72 horas para el material de aporte tubular. Desde este punto de vista se puede afirmar también que el material de aporte tubular confiere a la unión soldada propiedades anticorrosivas del mismo nivel que la soldadura convencional.
  
- ✓ En términos generales, es factible utilizar un Material de Aporte Tubular en procesos de soldadura GTAW sin gas de protección debido a que el fundente contenido en el interior de la varilla logra proteger satisfactoriamente el charco de soldadura haciendo generando una apropiada resistencia a la corrosión.
  
- ✓ Usar un material de aporte tubular, que no requiere gas de protección, generaría un ahorro considerable de tiempo y dinero, para la soldadura de elementos en los que se normalmente se emplea material de aporte convencional con gas de protección, tales como las tuberías.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Life To The Fatigue Of Meetings Welded Of Obtained Stainless Steel AISI 316 L By Means Of Process GMAW. REVISTA DE METALURGIA, 43 (3) MAYO-JUNIO, 215-227, 2007 ISSN: 0034-8570 E. S. Puchi-Cabrera\*\*, R. A. Saya-Gamboa\*\*, J. G. La Barbera-Sosa\*\*, M.H. Staia\*\*, V. Ignoto-Cardinale\*\*, J. A. Berrios-Ortiz\*\*\*, G. Mesmacque
- [2] Acero inoxidable 316 y 316 l propiedades y características Físicoquímicas Edwin Gamboa Poveda Robinson Álvarez Martínez Fundación universitaria los libertadores 2011.
- [3] Sidney H. Avner. Introducción a la metalurgia física, Segunda edición McGraw Hill 1995
- [4] Procesos industriales: Curso de capacitación de inspección en soldadura. Universidad del Trabajo de Uruguay, Concejo De Educación Técnico Profesional Mayo-Julio 2012
- [5] Miller, Guidelines For Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)
- [6] Soldexa Catálogo de material de aporte para GTAW TIGFIL2010 Mo Varilla ER316L
- [7] Kobelco Welding Consumables for Stainless Steels 3<sup>rd</sup> Special Edition.
- [8] Kobelco Welding of America Catálogo TGX series.
- [9] L. L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein. Corrosion. Metal Environment Reactions, Third Edition. Butterworth Heinemann 2000.
- [10] Robert Kelly, John Scully, David Shoesmith, Rudolph Buchheit. Electrochemical Techniques In Corrosion Science And Engineering. Marcel Dekker Inc. 2002.
- [11] V. S. Sastri, Edward Ghali, Mimoun Elboudjaini. Corrosion Prevention and Protection Practical Solutions. John Wiley & Sons, Ltd. 2007
- [12] Seifedine Kandry. Corrosion analysis of Stainless Steels, Lebanese International University. European Journal of Scientific Research Vol 22, Num 4. 2008
- [13] ASM International. Basic Understanding of Weld Corrosion, Chapter 1. ©2006
- [14] Einar Bardal, Corrosion and Protection. Springer 2003.

- [15] Nestor Perez. Department of Mechanical Engineering University of Puerto Rico Electrochemistry And Corrosion Science. Kluwer Academic Publishers 2004.
- [16] Anees U Malik and Saleh A. Al-Fozan. Pitting Behaviour Of Type 316l S.S In Arabian Gulf Seawater. 1992.
- [17] ASTM G61-86 Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-,Nickel-, or Cobalt-Based Alloys
- [18] Mansfeld F., Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy for the Study of corrosion protection by polymer coatings, Journal Of Applied Electrochemistry, 25, pp. 187-202 (1995)
- [19] ASTM G5-13 Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. Approved February 2013.
- [20] J.M. Bastidas, J.L. Polo, C.L. Torres, E. Cano. A Study on The Stability of AISI 316L Stainless, Steel Pitting Corrosion Through Its Transfer Function.
- [21] E.E. Stansbury, R.A. Buchanan, Fundamentals of Electrochemical Corrosion. ASM International 2000.
- [22] ASTM G102-89 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. 2010.
- [23] ASTM G48 – 11 Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution

5. ANEXOS

