

Mecanismos de corrosión en cordones de soldadura del acero api 5xl-70 del Proyecto Camisea

Manuel E. Esteves Pairazamán¹; Segundo A. Távara Aponte²

¹Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, Perú; manuelestevesp@hotmail.com.

²Departamento Académico de Física, Facultad de CFYM. Universidad Nacional de Trujillo, Perú. aristidestavara@hotmail.com.

Recibido: 16-02-2015

Aceptado: 07-03-2016

RESUMEN

En el presente trabajo se investigaron los mecanismos de corrosión de los cordones de soldadura del acero API 5XL-70 del proyecto CAMISEA, con el propósito de evaluar su resistencia a la corrosión, a partir de una curva de polarización, obtenida de los ensayos potenciostáticos realizados en un medio corrosivo de solución de NaCl al 3.5%. Se tomaron en cuenta las uniones soldadas debido a que son lugares susceptibles a la corrosión. Se ensayaron tres probetas de material base, y tres probetas soldadas con electrodo E7018. Para los ensayos de corrosión se siguió la norma ASTM G1-72, evaluados mediante una curva de polarización, empleando la norma ASTM G5-78, determinándose la velocidad de corrosión. Los ensayos mostraron que la corrosión fue de tipo uniforme. Las probetas soldadas presentaron una velocidad de corrosión de 1.43 gr/cm².año, y las probetas de material base presentaron una velocidad de corrosión de 0.41 gr/cm².año. Se concluye que la junta que lleva como material de aporte E7018 a pesar de tener mejores propiedades mecánicas y electroquímicas que el material base, presenta un menor comportamiento sobre la resistencia a la corrosión, que el material base, porque presenta baja penetración en el pase de raíz, creando así un concentrador para la iniciación de la corrosión. La susceptibilidad a la corrosión se ve influenciada por la presencia de una mayor densidad de inclusiones, por tener estos un comportamiento anódico, y ser de fácil disolución química ante los iones cloruros presentes en el agua de mar simulada debido a que la microestructura contiene un alto contenido de ferrita, los cordones muestran evidencias de disolución anódica de la superficie.

Palabras Clave: Resistencia a la corrosión, curva de polarización, acero API 5L-X-70, cordón de soldadura

ABSTRACT

In this study the mechanisms of corrosion of steel welds 5XL-70 API Camisea project, in order to evaluate their resistance to corrosion, from a polarization curve obtained from potentiostatic tests performed were investigated in a corrosive medium NaCl 3.5%. Were taken into account because of the welded joints which are susceptible to corrosion sites. It should be noted that the country has not conducted such studies Corrosion three specimens were tested base material, and three specimens welded with E7018 electrode. For corrosion testing standard ASTM G1-72, evaluated by a polarization curve, using standard ASTM G5-78, determining the corrosion rate was followed. The tests showed that corrosion was uniform rate. The tests showed that corrosion was uniform rate. Welded specimens showed a corrosion rate of 1.43 gr/cm².year, and base material specimens showed a corrosion rate of 0.41 gr / cm².year. It is concluded that the board which bears the filler E7018 despite having improved mechanical and electrochemical properties as the base material has lower performance on resistance to corrosion, the base material because it has low penetration pass root, thus creating a hub for corrosion initiation. Susceptibility to corrosion is influenced by the presence of a higher density of inclusions, having these anodic behavior, and easily chemical solution to the chloride ions present in the simulated sea water because the microstructure containing a high ferrite content, and welded joints show evidence of surface anodic dissolution

Keywords: Corrosion resistance, polarization curve, steel API 5L X-70, welded joints.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el transporte de gas, petróleo y sus derivados a través de tuberías ocupa un lugar importante a nivel mundial, tal es así que se analizan las estadísticas de la Association of Pipes Lines para los Estados Unidos, se encuentra que entre el periodo de 1982 al 2010, el porcentaje de toneladas de petróleo crudo transportadas a través de tuberías, respecto a total de toneladas transportadas, aumento de 43% hasta 78%. Esta misma tendencia al crecimiento de las tuberías instaladas e hidrocarburos transportados por ellas se manifiesta en otros países, en el caso particular de Latinoamérica la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX) en el año 2004 operaba 4661 Km. de oleoductos y 7373 Km. de gaseoducto y la empresa Petróleos Brasileños (PETROBRAS) 30343 Km. de tuberías. En el Perú el proyecto CAMISEA opera un sistema de 732 Km. gaseoducto y 650 Km. de poliducto, ambas tuberías comienzan en las Malvinas (Cuzco) y luego atraviesan la selva tropical amazónica y la cordillera de los andes (4800 m sobre el nivel del mar), el gasoducto termina en Lurín, mientras que el poliducto el cual transporta gas natural líquido (GNL) termina en a planta de fraccionamiento ubicada al sur de Pisco. Las reservas recuperables en los lotes 56 y 88, ubicados en Camisea, ascienden a 13.8 trillones de pies cúbicos (TPC), ya habiéndose firmado el contrato del lote 88 destinando el 100% al consumo interno se esperaba el mismo esquema para el lote 56 ya que gran parte del transporte y distribución es cubierta por los peruanos en los recibos de servicio eléctrico. El proyecto Camisea, actualmente en funcionamiento, es la piedra angular del cambio de matriz energética en el Perú, que permitirá cambiar el uso de combustibles contaminantes y caros como la gasolina y el petróleo, por el más limpio y barato gas natural, asimismo favorecer ampliamente la industria (vehicular, de distribución, de generación de electricidad, etc) y se ha creado directa e indirectamente miles de empleos en el Perú. [Belia, 2012; Norma API 5L, 200; Gonzalez, 1997; Frederiksson, 1982]

Sin embargo estos ductos al exponerse al medio que los rodea, son susceptibles a ataques por corrosión, siendo las zonas más críticas los cordones de soldadura de las tuberías, esto debido a la presencia de entallas, defectos en pase de raíz, escoria secundaria, Zona afectada por el calor (ZAC), defectos superficiales, inclusiones no metálicas, heterogeneidades estructurales que lleva consigo la unión soldada y cuando se encuentra en zonas agresivas: agua, cloruros, sulfuros, alta presión de operación, estas condiciones favorecen para que se desarrolle el mecanismo de corrosión. [Baker, 1967, 1967]

El Gaseoducto de CAMISEA, constituye una de las obras de envergadura del país, sin embargo en estos últimos años está sufriendo una serie de fallas, que involucra la salud, la seguridad y la vida de las personas que trabajan o viven cerca del Gaseoducto. Una de las fallas que está sufriendo el Gaseoducto es la corrosión en las uniones soldadas. Y con el propósito de encontrar una solución a este problema, es que en este trabajo se investigó los mecanismos de corrosión de los cordones de soldadura del acero API 5L X-70, utilizada en el gaseoducto del Proyecto CAMISEA. [API 5L, 2010]

Este trabajo de investigación, se enmarca dentro de la línea de investigación de Ciencia de los Materiales, dentro del área de Corrosión y Fractomecánica, del Laboratorio de Física de Materiales, del Departamento Académico de Física, de la Universidad Nacional de Trujillo. Y como antecedentes a este trabajo es la Tesis de Ingeniero Mecánico de Romulo Silva, R. (2000), realizada en este Laboratorio, el cual estudio aceros API 5LX-52 y API 5LS-52, utilizados en el Oleoducto Nor-Peruano. En este trabajo se estudió los mecanismos de corrosión en cordones de soldadura del acero API 5LX-70 utilizado en el gaseoducto del Proyecto CAMISEA. [Silva, 2000; Gordon, 1994]

D. Belmonte, y S Liscano; (2011), evaluaron la resistencia a la corrosión de tuberías api 5L X-52 fabricadas con y sin costura, sometieron a un ensayo de corrosión a través de la técnica electroquímica de Polarización Potenciodinámica en un medio corrosivo de solución de NaCl al 3,5 % aireado. Se evidencia que no existe influencia de los tipos de unión evaluados sobre la resistencia a la corrosión. Se encontraron la acción de dos mecanismos: 1) Perdida de material uniforme, en las condiciones de las tuberías sin costura y con costura a 180° del cordón de soldadura, y 2) Corrosión por picaduras en las condiciones de la tubería con costura longitudinal y helicoidal. [Belmonte, 2011]

R. Requiz, S. Camero, V. Aristizabal Y A. Rivas, (2008) estudiaron del daño por hidrogeno en uniones soldadas de un acero api 5L52, emplearon técnicas de permeación y de carga catódica de hidrógeno. El material fue caracterizado mediante microscopía electrónica de barrido y de transmisión. La

susceptibilidad al daño por hidrógeno fue similar tanto en el metal base como en el cordón de soldadura. Este comportamiento se vincula a la microestructura homogénea constituida por perlita y ferrita, que presentan ambos, aun cuando existen diferencias en el tamaño de grano. El cordón de soldadura tenía dimensiones muy pequeñas, donde la zona de fusión y la afectada por el calor poseen espesores de 5 mm y 1 mm, respectivamente. El daño inducido por hidrógeno se presentó en forma de ampollas en la superficie del material, asociado, principalmente, a la presencia de inclusiones globulares y semiglobulares ricas en aluminio. Además, se manifestó una disolución parcial de las inclusiones y/o un ataque de la matriz en la zona adyacente a la inclusión. [Requiz, 2008]

Rodriguez, N. Anteliz.() Evaluaron de la susceptibilidad a la corrosión por picado del acero api 5L X-42, expuesto a una ambiente con cloruros y CO_2 mediante la técnica de ruido electroquímico. La concentración de iones cloruros (Cl), Ph, y la presión parcial de CO_2 a la cual se operan las tuberías de transporte son factores críticos e importantes en el proceso de degradación de los aceros de bajo carbono como el acero API 5L X42 expuesto a un medio acuoso en presencia de CO_2 . Los ensayos se realizaron en una celda electroquímica, variando las concentraciones de (Cl) y la presión parcial de CO_2 , y se realizaron medidas de ruido electroquímico por 10 minutos para cada una de las condiciones evaluadas. Mediante parámetros estadísticos como: desviación estándar, Kurtosis, sesgo, índice de picado, y transformadas rápidas de Fourier, se determinó la susceptibilidad a la corrosión por picado del acero API 5L X42. [Rodríguez, 2010]

Este trabajo de investigación, se enmarca dentro de la línea de investigación de Ciencia de los Materiales, dentro del área de Corrosión y Fractomecánica, del Laboratorio de Física de Materiales, del Departamento Académico de Física, de la Universidad Nacional de Trujillo. Y como antecedentes a este trabajo es la Tesis de Ingeniero Mecánico de Romulo Silva, R. (2000), realizada en este Laboratorio, el cual estudio aceros API 5LX-52 y API 5LS-52, utilizados en el Oleoducto Nor-Peruano. En este trabajo se estudio la influencia de la soldadura sobre la resistencia a la corrosión del acero API 5L X-70, utilizada en el gaseoducto del Proyecto CAMISEA. Para lo cual evaluaremos mediante una curva de polarización la resistencia a la corrosión del acero API 5L X-70, soldado, en comparación con el acero API 5L X-70, sin soldar usado como material base. Cabe destacar que este trabajo conto la colaboración de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), quienes nos proporcionaron el material soldado ha sido obtenido del Proyecto CAMISEA, soldado con sus soldadores calificados y con los procedimientos de soldadura especificados por el Proyecto. [Callister,1995; Parkins, 1993]

1.1 TUBERÍAS AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API -5L)

Las tuberías constituyen la forma masiva para el transporte de gas y petróleo con el menor número de accidentes sobre cantidades transportadas. Además de este alto grado de seguridad, las tuberías enterradas en el suelo, no tienen impactos visuales o acústicos y no producen vapores y humos que podrían ser responsables de la contaminación del aire. Son de este hecho un modo de transferencia global seguro, en comparación con los otros modos posibles. [Norma API, 2000]

1.2 SOLDADURA

La soldadura constituye uno de los recursos tecnológicos fundamentales en el mundo moderno. La soldadura, que es necesaria para formar estructuras complejas, va extendiéndose en todas las ramas de la industria, incidiendo con gran fuerza en los aceros inoxidable permitiendo así realizar grandes construcciones que de otra forma serían difíciles de construir y a su vez antieconómicas. Las industrias petroquímicas, de transporte, alimenticias, aeroespacial o electrónica no podrían haber alcanzado su grado de desarrollo actual si no hubieran estado disponibles las técnicas de soldadura y hoy prácticamente no existe emprendimiento tecnológico alguno en que la soldadura no intervenga en una de sus etapas. [Prado, 1995]

El procedimiento de soldadura debe ser diseñado de manera de evitar una pérdida de tenacidad y deterioro de la resistencia a la corrosión por un excesivo crecimiento de grano y formación de precipitados de nitruros de cromo. La presencia de uniones soldadas en una estructura, influencia en la iniciación y propagación de una fisura, manifestándose de las siguientes maneras:

- Introducción de tensiones residuales en la estructura de valores cercanos a la tensión de fluencia del material.
- Transformaciones metalúrgicas debidas al ciclo térmico sufrido por la pieza durante la soldadura.

- Introducción de defectos y discontinuidades geométricas en la estructura.

1.3 Aspectos a tener en cuenta en una unión soldada

Toda soldadura produce un cambio geométrico debido al cordón soldado y un cambio estructural metalúrgico en la zona de transición (ZAC). Esto hace que se deban analizar los estados tensionales que se producen por los cambios de forma de la estructura, ya que estos cambios pueden producir concentraciones de tensiones que elevan los esfuerzos en estas zonas. Es importante elegir un proceso adecuado con los parámetros de soldadura para que resulte una buena junta. [Fernandez de Palencia, 1982]

1.3.1 Calor aportado

Un exceso de calor aportado puede producir en la zona de soldeo, grietas en caliente, fragilidad por crecimiento de grano, en las zonas afectadas térmicamente o formación de constituyentes frágiles o de baja resistencia. La falta de calor aportado puede originar defectos de ligación del material de aporte con el metal base e incluso grietas por hidrógeno ocluido. Es necesario, por lo tanto, una solución de compromiso, entre el metal base, metal de aporte y procedimiento de soldadura, tomando las precauciones necesarias según los espesores de la estructura, utilizar precalentamiento o post calentamientos para evitar enfriamientos bruscos que puedan originar grietas o componentes metalúrgicos indeseables. [Quivoy, 2004]

1.3.2 Defectos producidos por la soldadura

Una soldadura debe intentar obtener la calidad suficiente para el trabajo encomendado a la junta en cuestión. Los defectos de la soldadura tienen una gran importancia especialmente porque la tendencia actual es aumentar las tensiones y disminuir los coeficientes de seguridad. Usando métodos no destructivos es posible detectar pequeñas imperfecciones que debieran haberse evitado, pero todavía es prácticamente imposible detectar por métodos no destructivos las transformaciones metalúrgicas no deseables que se han producido. Los defectos de una junta se pueden dividir en dos categorías: físicos y metalúrgicos. Los defectos físicos se pueden clasificar en cuatro grupos: grietas cuyo significado físico es la gran agudeza de la entalla, defectos de fusión,

porosidad, y perfil del cordón soldado, ver figura 1. [Tam Amaya, 2006; Trotti Juan, 1988; Zambrano, 2010]

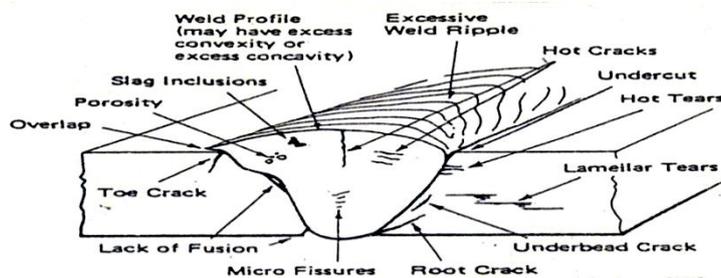


Fig. 1. Representación esquemática de los defectos de soldadura

1.4 CORROSIÓN

La **corrosión** se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico del medio ambiente de su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos. Es un proceso unitario, termodinámicamente espontáneo, e irreversible y cinéticamente factible a velocidades mensurables; presentado en sistemas constituidos por materia transformada expuesta a un medio ambiente corrosivo; dando como resultado la degradación o deterioro de esa materia hasta convertirse en la materia de la que provino. [Gonzales Fernandez, 1989]

El costo de la corrosión es exorbitante, y ha llevado a que numerosos países se vieran obligados a legislar a fin de aminorar su impacto en la economía. Por otro lado, los metales son recursos no

renovables, y el suministro de algunos de ellos se está volviendo crítico. Además la corrosión suele ser causa de contaminación del medio ambiente, y por ello comienza a despertar interés en los sectores relacionados con la protección ambiental. [Iraldo y Chaves, 2002]

- I.- Las pérdidas ocasionadas por la corrosión son sumamente elevadas, y en muchos países son motivo de seria preocupación a nivel gubernamental.
- II.- Una parte muy importante de estas pérdidas podría ser evitada aplicando los conocimientos actuales de corrosión.

1.4.1 Clasificación de los procesos de Corrosión

Los procesos de corrosión pueden ser clasificados para su estudio según el medio en el que se desarrolla o según su morfología. Clasificación según la forma. [Pourbaix, 1987; Quintero, 1998; Uhlig, 1979; Vetter, 1967]

Clasificación según la forma

Corrosión Uniforme. Es la forma más benigna en la que se puede presentar la corrosión. El ataque se extiende en forma homogénea sobre toda la superficie metálica y la penetración media es igual a todos los puntos. Un ataque de este tipo permite calcular fácilmente la vida útil de los materiales corroídos. La corrosión atmosférica es el mejor ejemplo. Otro ejemplo es el ataque de un acero por una solución ácida.

Corrosión en Placas. Incluye los casos intermedios entre corrosión uniforme y corrosión localizada. En este caso el ataque se extiende más en algunas zonas, pero se presenta aun como ataque general.

Corrosión por Picado. Este tipo de ataque así como el intergranular y el fisurante, son las formas más peligrosas bajo las cuales se pueden presentar la corrosión. En estos casos de ataque localizado la cantidad de material corroído no guarda relación con la magnitud de los inconvenientes que pueda causar. Durante el picado el ataque se localiza en puntos aislados de superficies metálicas pasivas, propagándose al interior del metal en forma de canales cilíndricos. En la práctica puede presentarse como perforación de cañerías o tanques.

Corrosión Intergranular. Se presenta como una franja estrecha de ataque que se propaga a lo largo de los límites de grano. Este ataque se extiende hasta inutilizar el material afectado.

Corrosión Fisurante Conocida comúnmente como corrosión bajo tensiones. Puede presentarse cuando un metal está sometido simultáneamente a la acción de un medio corrosivo y de tensión mecánica de tracción. Se forman fisuras que pueden ser transgranulares o intergranulares y que se van propagando hacia el interior del metal, hasta que las tensiones se reflejan o el metal se fractura. La velocidad de propagación oscila en general entre 1 y 10 mm/h. [Requiz, 2008; Thompson, 2000]

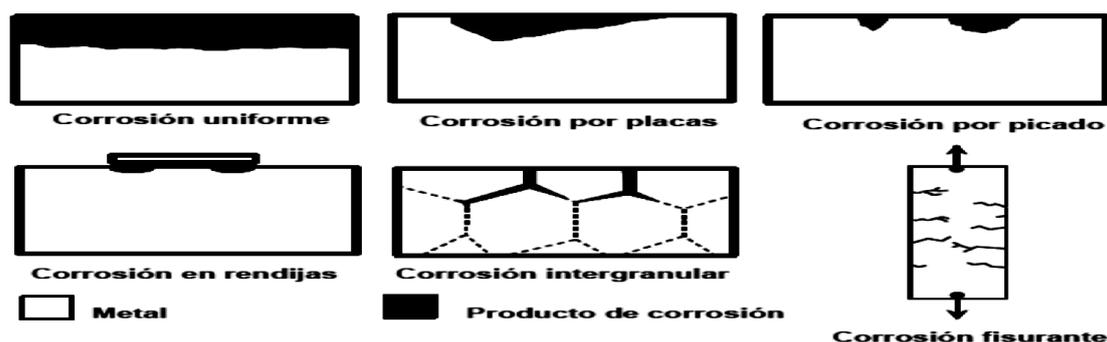


Fig. 2. Representación esquemática de las diferentes formas de corrosión. En todos los casos el metal es visto en corte.

1.5 CURVAS DE POLARIZACION

Las curvas de polarización nos sirven para evaluar la resistencia a la corrosión de los materiales metálicos. Se pueden determinar aplicando una corriente constante y midiendo el potencial. Se repite este procedimiento para diferentes valores de corriente, midiendo en cada caso el nuevo potencial alcanzado. Se tienen así las llamadas curvas galvanostáticas. Esta es la técnica de medición más simple, en cuanto a equipamiento se refiere, pero solamente puede usarse cuando las curvas de polarización

muestran una variación monótona. No es adecuada en aquellos casos en los que hay cambios bruscos en la curva i-E, tal como ocurre durante la pasivación de metales.

La otra forma de determinar la relación i-E es aplicando un potencial constante y determinado la forma en que varía la corriente. Estas curvas potencioestáticas requieren equipamientos más complejos que las anteriores, pero son las que encuentran mayor aplicación en los estudios de corrosión de metales. [Smith, 2004]

1.6 CURVAS POTENCIOSTATICAS

Conservar una probeta a un potencial constante, que no afectado por la corriente, no puede conseguirse con circuitos tan simples como los galvanostáticos. En general se requiere un circuito electrónico que tenga el potencial constante, y tenga una velocidad de respuesta suficientemente grande. Estos circuitos, potencioestáticos, fueron desarrollados inicialmente por Hickling en 1942. La forma de operar de un potencioestado se ve esquemáticamente en la figura siguiente: [Gonzales, 1989; Smith, 2004]

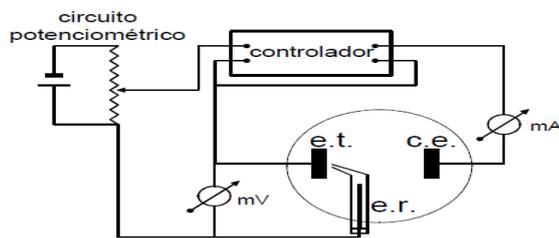


Fig. 3.- Descripción esquemática del funcionamiento de un potencioestado. e.t.: electrodo de trabajo o probeta; e.r.: electrodo de referencia; c.e.: contraelectrodo inerte; mV: milivoltímetro; mA: amperímetro o registrador de corriente.

Con el circuito potenciométrico se fija el potencial deseado entre el electrodo de trabajo e.t. y el electrodo de referencia e.r.. Cualquier diferencia que surja entre el potencial fijado y el potencial existente entre el e.t. y el e.r. es detectada como una señal de error por el controlador, que rápidamente ajusta la corriente que circula entre el electrodo de trabajo e.t. y el contraelectrodo c.e hasta que la señal de error es reducida a cero.

La corriente medida en el instrumento mA es igual a la que circula por la probeta, y se usa como medida de la velocidad de corrosión del espécimen. La curva de polarización potencioestática se obtiene a partir de los valores de corriente medidos en mA, para cada potencial. Algunos potencioestatos miden la corriente de corrosión sobre la conexión que termina en e.t.

1.7 Método de intersección

Para polarizaciones suficientemente grandes:

$$\eta \gg RT/(\alpha nF) \text{ o bien } -\eta \gg RT/(\beta nF)$$

la ecuación general se reduce a la ecuación de las semireacciones anódica y catódica, que se corresponden con las rectas de Tafel, con pendientes

$$b_a = 2.3RT/(\alpha nF) \quad \text{y} \quad b_c = -2.3RT/(\beta nF)$$

Para comprobarlo basta tomar logaritmos en cualquiera de las citadas ecuaciones, por ejemplo en la (1).

$$\text{Log } i_a = \text{log } i_{\text{corr}} + (\alpha nF/2.3RT) \cdot \eta \text{ -----(1)}$$

De donde:

$$\eta = (-2.3RT/(\alpha nF)) \text{log}(i_{\text{corr}}) + (2.3RT/(\alpha nF)) \text{log}(i_a) = a + b_a \text{log}(i_a) \text{ -----(2)}$$

pues, para un sistema metal/medio dado i_{corr} tiene un valor determinado y el primer término del segundo miembro puede englobarse en la constante a de la ley de Tafel. En las proximidades de E_{corr} para polarizaciones pequeñas, los procesos anódicos y catódicos se influyen mutuamente y las curvas

de polarización experimentales se apartan del curso semilogarítmico previsto por la ley de Tafel. Sin embargo, como $\eta = 0$ (para el E_{corr}) de cualquiera de las ecuaciones resulta:

$$i_a = |i_c| = i_{\text{corr}}$$

se llega a la i_{corr} buscada sin más que extrapolar cualquiera de las rectas de Tafel obtenidas a polarizaciones grandes hasta la línea $E = E_{\text{corr}}$ tal como se esquematiza en la Figura 4. [Uhlig, 1979]

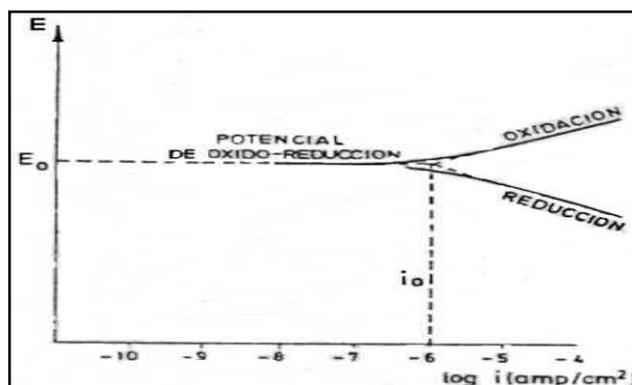


Fig. 4. Rectas de polarización de Tafel

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Objeto de estudio

En esta investigación el objeto de estudio fue los mecanismos de corrosión en los cordones de soldadura del acero API 5L X-70, utilizado en el gaseoducto del Proyecto CAMISEA.

2.2 PROPIEDADES DEL ACERO API 5L X - 70

2.2.1 Composición Química

Tabla 1. Composición química nominal del acero API 5L X-70 (%peso)

	Mn	Si	S	P	Al	Nb	Cu	Cr	Ni	Ti	Ca	N ₂
C	0,03	1,5	<0,00	<0,01	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	0,01	0,002	0,00
	7	0	4	3	5	3	9	7	6	6	0	5
												4

2.2.2 Propiedades Mecánicas

Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo a la norma ASTM E 8M y sirven para determinar las propiedades en tensión como la resistencia a la fluencia (σ_0), la resistencia a la tracción (σ_{UTS}), el punto de ruptura del material (σ_{F}), así como la reducción de área. El procedimiento en general se realiza a temperatura ambiente, aplicando la carga de tracción lentamente hasta la ruptura del material. El acero suministrado para fabricar los tubos debe de cumplir con las propiedades indicadas en la tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos de Tensión para PSL2 (de acuerdo a la norma API 5L):

Grado	Tensión de fluencia Mínima		Tensión de fluencia Máxima		Resistencia a la tensión última, Mínima		Resistencia a la tensión última, Máxima	
	Psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
70	70000	483	90000	621	82000	565	110000	758

Variable independiente: mecanismos de corrosión

Variable dependiente: cordones de soldadura del acero API 5L X-70

2.3 Instrumentación

2.3.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS

Materiales Consumibles.

Fabricación de Probetas.

- Probetas para ensayos de Tracción (Norma ASTM E 8M).
- Probetas para ensayos de Corrosión.
Análisis Metalográficos.
- Para el desbaste y pulido: Lijas N° 220, 280, 400, 600, 1000, 1500, 2000.
- Alúmina: 0,5 micras.
- Algodón, alcohol, nital al 2% (Solución de ácido nítrico al 2% en alcohol metílico).
- Rollo fotográfico.

2.3.2 Equipos Utilizados

Análisis Metalográfico.

- Microscopio Óptico: NEOPHOT 21.
- Devastadoras: Metasinex.
- Pulidora rotativa: DAP-V.

Ensayo de Tracción

Máquina Universal ALFRED J. AMSLER & Co. de 10 Tn de capacidad de carga.

Ensayos de Dureza.

Durómetro: HERCKERT 220 VGA

Ensayo de Corrosión

- Potenciostato.
- Alimentación: 220 V. (+/- 10%) -50/60 Hz.
- Consumo a plena carga: 100 VA.
- Temperatura de operación: 0 – 40 °C.
- Tensión de salida: +/- 30 V.
- Estabilidad: +/- 1V.
- Celda electroquímica: electrodo de calomel saturado, electrodo de platino.

2.4 Métodos y Técnicas:

- Se prepararon 3 probetas de corrosión de material base acero API 5L X-70 sin soldar, según la norma AWS A5 1-78.
- Se prepararon 3 probetas de corrosión de material base acero API 5L X-70 soldadas, según la norma AWS A5 1-78. (Cabe destacar que las probetas vienen soldadas, según procedimiento de soldadura utilizado en los tubos del proyecto CAMISEA)
- Se prepararon probetas metalográficas para caracterizar el material base, así como la Zona afectada por el calor (ZAC), y el material de aporte.
- Se hicieron ensayos de corrosión usando como medio corrosivo una solución de NaCl al 3.5% y usando el electrodo de calomel saturado con una velocidad de barrido de 10 mV/min, obteniendo la curva de polarización, tanto para el material base como para el material soldado. Evaluando la influencia del cordón de soldadura en el acero API 5L X-70, tomando como grupo testigo probetas del mismo acero sin soldar.

Ensayos de Corrosión

Para los ensayos electroquímicos, las tres probetas que se obtuvieron de la norma AWS A5.1-78 para las juntas soldadas y para el material base, fueron encapsuladas en resina epoxy, éste recubrimiento permitió dejar un área expuesta con una superficie perfectamente determinada de la probeta (zona de fusión); se estableció el contacto eléctrico de cada probeta a través de un alambre de cobre revestido perfectamente unido a la probeta. La superficie expuesta, de las probetas, se las ensayó lijadas a 2000 mallas, luego fueron montadas en la celda electroquímica.

Para los ensayos electroquímicos se usó una celda de corrosión electroquímica convencional, con electrodo de referencia de calomel saturado (SCE) y contraelectrodo de platino, usando como medio corrosivo una solución de NaCl al 3.5%.

Estos ensayos fueron del tipo potencioestáticos, comenzando a un potencial catódico de 300mV por debajo del potencial de corrosión de cada probeta a una velocidad de barrido de 10mV/min. Previo a cada medición se permitió a las probetas alcanzar un potencial de corrosión estable por exposición a la solución durante un tiempo de 50 minutos.

Se determinó la densidad de corriente de corrosión utilizando el método lineal o de intersección de las pendientes de Tafel, de cada probeta; con estas velocidades se calculó por media simple, la velocidad de corrosión.

III. RESULTADOS y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de los ensayos de Corrosión

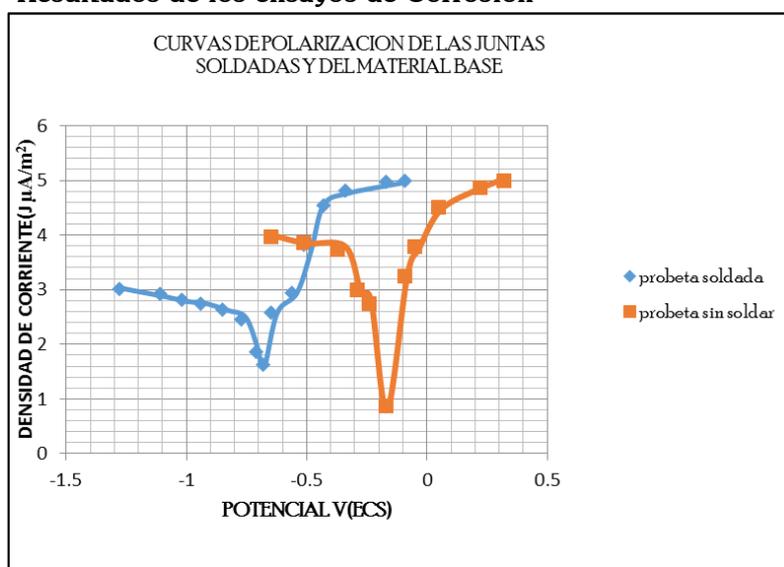


Fig. 5. Curvas de Polarización Electroquímica obtenidas de los ensayos potencioestáticos de las probetas soldadas y sin soldar, utilizando como medio corrosivo una solución de NaCl al 3.5%.

Tabla 3. Resultados promedio de las curvas de polarización de las juntas soldadas y material base

MATERIAL	Probetas soldadas	Probetas sin soldar
Potencial corrosión.	- 0.68 V	- 0.16 V
Densidad corriente (J)	156.94 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	45.12 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Velocidad Corrosión	1.43 $\text{gr}/\text{cm}^2.\text{año}$	0.41 $\text{gr}/\text{cm}^2.\text{año}$
Velocidad Penetración	1.84 $\text{mm}/\text{año}$	0.53 $\text{mm}/\text{año}$

En la figura 5, y tabla 3; se presentan los resultados promedio de los ensayos de Polarización Potencioestáticos para las probetas soldadas, así como para las probetas sin soldar. En la figura 5 se evidencia que el potencial de corrosión varía siendo más noble el potencial obtenido de las probetas sin soldar, en la tabla 3 se muestra los valores, así mismo según los datos calculados de velocidad de corrosión y velocidad de penetración utilizando el método de las pendientes de Tafel se puede

evidenciar que las probetas soldadas presentan una menor resistencia a la corrosión. Del análisis de la microestructura y de las observaciones macro realizadas a las probetas después del ensayo de corrosión se puede obtener información del tipo de corrosión y de los mecanismos de corrosión del acero API 5L X-70.

3.2 MICROESTRUCCTURAS

El análisis de la microestructura de las diferentes muestras se realizó por microscopía óptica después del pulido mecánico y tratamiento químico con Nital, las observaciones muestran microestructuras locales específicas. Se analizó la microestructura del material base, así como de las diferentes zonas del cordón de soldadura. Así mismo se analizaron los mecanismos de corrosión que muestra las probetas después de cada ensayo potenciales, a fin de poder identificar los mecanismo de corrosión.

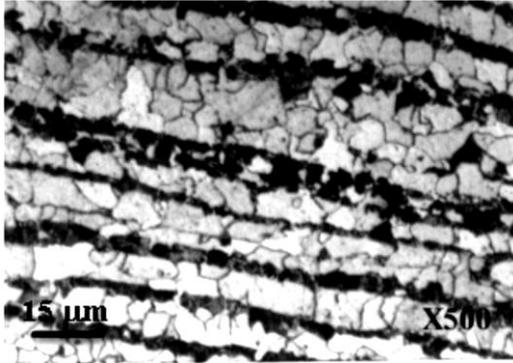


Fig. 6 Microestructura de la tubería de acero API 5L X52, Metal Base. Para el metal base, la microestructura es relativamente homogéneo, como bandas de ferrita y perlita paralelo al plan de laminación observado. Los granos de ferrita tienen una forma globular irregular y son ligeramente orientada en la dirección de la laminación, el rango de diámetros varían desde 7 a 15 micras, tal com se muestra en la figura 6.

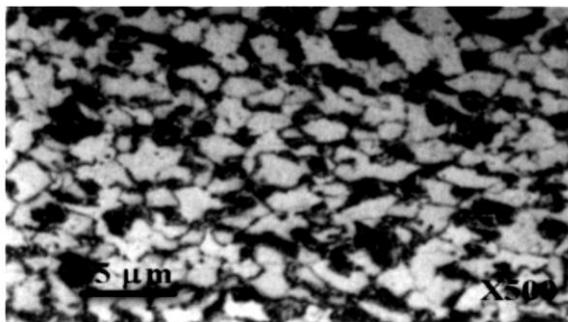


Fig. 7 .- Microestructura de la tubería de acero API 5L X52, ZAC. Para la ZAC, nos encontramos con la misma microestructura que el metal base con desaparición progresiva de la estructura de banda debido al calentamiento por debajo de la temperatura de austenización en esta zona.

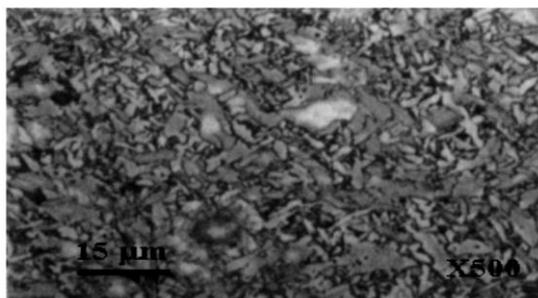


Fig. 8. Microestructura de los tubos de acero API 5L X52, se evidencia La zona del metal de soldadura, exhibe una microestructura bainítica formada durante el enfriamiento rápido del metal de fusión.

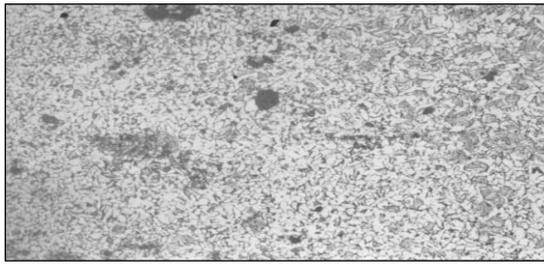


Fig. 9. La Porosidades e inclusiones no metálicas presentes en la Zona Afectada por el Calor en las probetas soldadas.

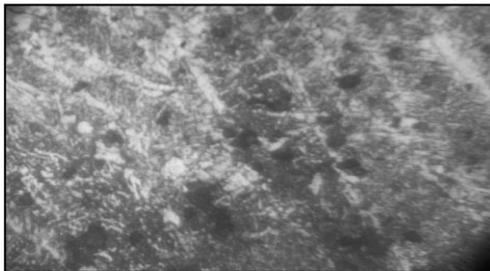


Fig. 10.- Porosidades e inclusiones no metálicas presentes en la Zona de Fusión de las probetas soldadas. 100X.

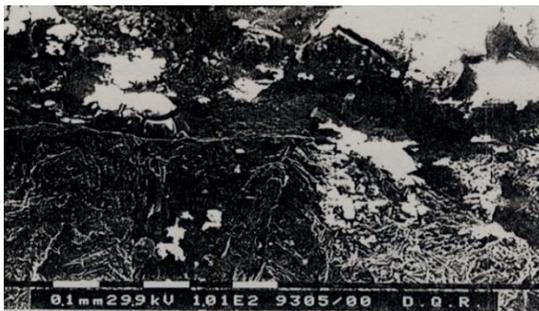


Fig. 11.- Fractografía SEM, muestra óxidos y sulfuros superficiales fisurados. Son lugares donde se nuclea la fisura principal en un ensayo de corrosión. Se observa disolución anódica.

De las figuras 9, 10, y 11 Se evidencia que los lugares de iniciación de fisuras generalmente son productos de corrosión (óxidos) e inclusiones no metálicas (sulfuras) ubicados en la superficie del metal. Estos últimos tienen influencia preponderante en el picado debido a que son mejores conductores que la película pasivante, y por su tendencia a disolverse en medios acuosos son centros activos para la iniciación del picado, y por lo tanto núcleo de fisuras. Los sulfuras y la película pasivante en contacto con el medio corrosivo forma un par galvánico que favorece dicho ataque.

El medio corrosivo influye además en el mecanismo de propagación de las fisuras donde se observa disolución anódica. ver figura 11.

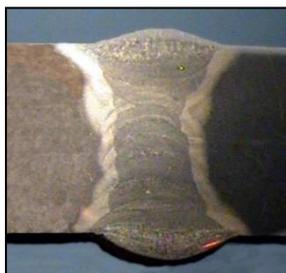


Fig. 12. Macroestructura de la junta soldada a 10X. Donde se puede apreciar las porosidades e inclusiones presentes y las pasadas de soldadura



Fig. 13. Macroestructura de la junta soldada a 10X. Donde se puede apreciar el número de pasadas, e inclusiones y poros presentes en esta junta.

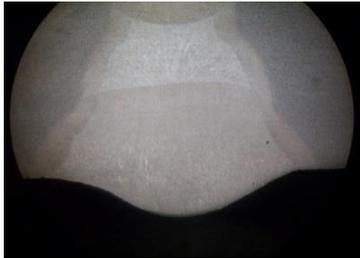


Fig. 14. Macroestructura de la junta soldada a 5X. Donde se puede apreciar una inclusión en la zona de fusión, muy cercana a la ZAC.

Del análisis de las figuras 12, 13 y 14 se evidencia que en las macro estructuras obtenidas de los cordones de soldadura se puede apreciar que el contenido inclusionario es elevado, mostrando un comportamiento de zonas donde se iniciaría los procesos de corrosión, así mismo los defectos propios de un cordón de soldadura tales como falta de fusión en la raíz, escoria secundaria entre pasada del material de aporte, y lo más crítica es la Zona afectada por el calor (ZAC), contribuyendo siendo pues estos lugares de iniciación de fisuras, lo que produce fallas en el material. [11, 12]

IV. CONCLUSIONES

- ✓ Se concluye que la junta soldada que lleva como material de aporte E7018 a pesar de tener mejores propiedades mecánicas y electroquímicas que el material base, presenta un menor comportamiento sobre la resistencia a la corrosión, que el material base, porque presenta baja penetración en el pase de raíz, creando así un concentrador para la iniciación de la corrosión. Encontrando que los mecanismos de corrosión que predominan de los cordones de soldadura del acero API 5L X52, como efecto del medio corrosivo, son: disolución anódica localizada y ruptura de la pasividad, debido a que las probetas soldadas presentaron una mayor densidad y tamaño de inclusiones no metálicas. por tener estos un comportamiento anódico, y ser de fácil disolución química ante los iones cloruros presentes en la solución de NaCl al 3.5%, debido a que la microestructura contiene un alto contenido de ferrita, los cordones muestran y evidencias de disolución anódica de la superficie, y una disolución anódica localizada en inclusiones no metálicas como sulfuros de Manganeso o una fase que ha sido completamente disuelta,
- ✓ Debido a que el acero API 5XL-70, ha sido laminado en caliente y posee un alto nivel inclusionario, se recomienda hacer un estudio sobre la influencia del daño por hidrógeno provocado por los electrodos utilizados.
- ✓ A fin de proteger estas juntas contra los agentes corrosivos dispuestos en el medio, se recomienda recubrirlas con pinturas anticorrosivos de buena adherencia, con el fin de retardar el inicio del proceso de corrosión.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- API 5L. (2010). **Specification for Line Pipe API**. FORTY-THIRD EDITION.
- BAKER, G. AND WHITMAN (1967). “**Practical corrosion problems in relation to welded joints. I special characteristics of the welding process which can cause corrosion problems**”. Paper Brit. Corros. J.
- BAKER, R. G. AND WHITMAN. J.(1967). “**Practical corrosion problems in relation to welded joints. II. Corrosion problems in desing**”. Paper of British corrosión.
- BELALIA, A., RAHMAN, A., LENKEY, G., PLUVINAGE, G., AZARI Z. (2012). **SCIENTIFIC-Materials Science and Engineering.**“**Dynamic characterization of API 5L X52 pipeline steel**”. Suiza.EditorialTrans Tech.
- BELMONTE, D. (2011). **Liscano evaluación de la resistencia a la corrosión de tuberías api 5l x-52 fabricadas con y sin costura**, (2011). Memorias de las IX Jornadas de Investigación 2011 – UNEXPO Puerto Ordaz - 6 al 9 de Julio de 683. Departamento de Ing. Metalúrgica, UNEXPO
- CALLISTER, WILLIAM D. (1995). “**Ciencia de Ingeniería de Materiales**”. Ed. Reventa; 2da Edición Tomo I. Buenos Aires.
- Fernández de Palencia, Juan y Rocc. (1982). “**Patología de la unión soldada en aceros**”. CENNIM vol.. XII oct-dic.
- FREDERIKSSON, H. AND HILLERT. (1973). “**On the formation of manganese sulphide inclusions in steel**”. Scandinavian journal of Metallurgy 2.
- GONZALES FERNANDEZ, J.(1989). “**Control de la corrosión: Estudio y medida por técnicas electroquímicas**”. GRAFIPREN, S.A. Madrid, España,
- GONZALEZ, J. J.; JENKINS J. ; FREITAS, R. ; HADAD, A. 1997, **Análisis de falla y estudio de flexibilidad Gasoducto Anaco – Caracas tramo N50 – Arichuna**, inf. Tecn. N° INT-4215, 1997 INTEVEP, S.A., Los Teques, diciembre
- GORDON, H., SEQUERA N. 1994. **Caracterización de material API 5LX- 52 y análisis de defecto**, inf. Tecn. N° INTE- TETM-0037, 94., INTEVEP, S.A., Los Teques, Septiembre.
- IRALDO, E. G Y CHAVES, C.. 2002, **Departamento de Ingeniería mecánica, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia**, Medellín, pp. 59-64.
- NORMA API 5L. (2000). **Specification for Line Pipe** Forty- Second Edition, p.37.
- PARKINS, R. N. 1993.**Stress corrosion cracking of high pressure gas transmission pipeline**, Corrosion 93, NACE, PP. 1-267.
- POURBAIX, MARCEL. (1987). “**Lecciones de corrosión electroquímica**” CEBELCOR, Bruselas
- Prado Sixto y Delgado Walter. (1995). “**Relación entre diferentes interfases inclusión-matriz en aceros al daño por hidrógeno**”. UNT. Trujillo, Perú.
- QUINTERO, Omar. (1998). **Ciencia de los Materiales II**. Departamento de Ciencia de los materiales. Universidad Simón Bolívar. Capítulo 4. Caracas.
- QUIVOY F. (2004). «**Gestión de calidad aplicada al proceso de soldadura para el proyecto gas de camisea**». Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Universidad Nacional de Ingeniería.
- REQUIZ R, S. CAMERO, V., ARISTIZABAL Y A. RIVAS. (2008). **Estudio del daño por Hidrogeno en uniones soldadas de un acero API 5LX-52**. Revista de Metalurgia 44(2) Marzo-abril, 101-112, 208.
- RODRIGUEZ N., ANTELIZ C. (2010). **Evaluación de la susceptibilidad a la corrosión por picado del acero API 5LX-42, expuesto a un ambiente con cloruros y CO₂ mediante la técnica de ruido lectroquímico**. Universidad Industrial de Santander, Facultad de

Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metálica y Ciencia de Materiales, Bucaramanga – Colombia.

- SILVA, R. (2000). “**Análisis y Optimización de Propiedades Mecánicas en las Uniones Soldadas del Encamisado de Refuerzo de Tuberías de Acero al Carbono API 5LX-52 y API 5LS-52 del Oleoducto Nor – Peruano**”
- SMITH, William. (2004). **Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales**. Editorial McGraw – Hill. Tercera edición. Capítulo 5. Nueva York.
- TAM AMAYA, R. (2006). “**Influencia del proceso de soldadura SMAW y GMAW sobre la resistencia a la corrosión del acero ASTM A 36 en agua simulada tipo río**”. Tesis de Pregrado. Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Trujillo.
- THOMPSON, S.W.; HOWELL, P.R. (2000). **Materials Science Technology**. Volumen 8. Pagina 777- 84
- TROTTI JUAN L.(1988). “**Microestructuras del metal de soldadura**” Boletín técnico CONARCO N°90. Argentina.
- UHLIG HELBERT (1979) “**Corrosión y control de la corrosión**” Ediciones URMO. España.
- VETTER K. J. (1967). **Electrochemical Kinetics**, Academic Press, New York.
- ZAMBRANO-RENGEL G.E. (2010). Acosta D.R., “**Microstructure and characterization of API 5L X-52**”, Acta Microscópica Vol. 19, No. 1, pp. 60 – 68