ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

"Evaluación de la Influencia de la Soldadura en la Velocidad de Corrosión del Aluminio UNS A5083 de uso Naval, mediante Ensayos de Corrosión Acelerada"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERA NAVAL

Presentada por:

Diana María Chauvin Alvear

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2011

AGRADECIMIENTO

Agradezco al CP-FG Julio Ortiz, por obsequiarme esta oportunidad.

Al Ing. Julián Peña, por dirigir acertadamente esta investigación.

Al Ing. Livinstong Miranda, Jefe del Dpto. Diseño de ASTINAVE, por el apoyo incondicional brindado.

A todas mis amistades sinceras.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis sobrinos Anabella, Emilio y Antonio,

Los amo desde lo lejos, muy a mi pesar.

A mis Padres, Flavio y Silvana.

A mi Tía Tere.

DEDICATORIA ESPECIAL

Este trabajo está inspirado en todas aquellas desconocidas gigantes que no hay libro que las aguante.

Agnódice

Hypatia de Alejandría

Mary Wolstonecraft

Flora Tristán

Mama Tránsito Amagüaña

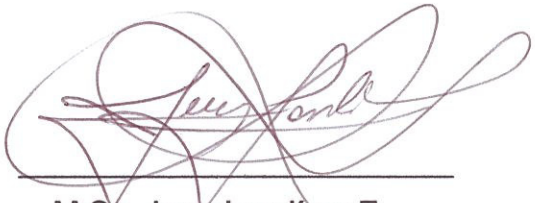
Inmenso etc.

Y muy especialmente, en

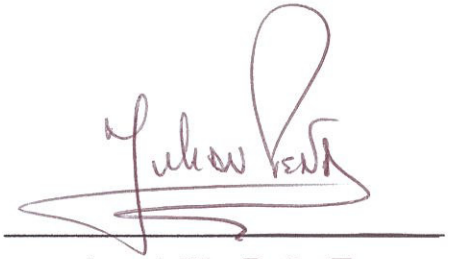
Simone de Beauvoir

"Una mujer no nace, se hace"

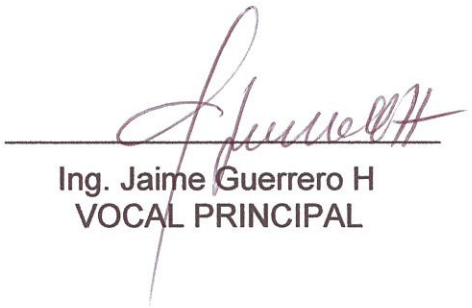
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



M.Sc. Jerry Landívar Z.
DECANO DE LA FIMCM
PRESIDENTE



Ing. Julián Peña E.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Jaime Guerrero H
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Diana María Chauvin Alvear

RESUMEN

Actualmente en el Ecuador, se está utilizando el Aluminio UNS A5086 y UNS A5083 para la construcción de embarcaciones de múltiples usos. Es el caso de las Lanchas Patrulleras MANABÍ, GUAYAS, LOS RÍOS y EL ORO, propiedad de la Corporación Aduanera Ecuatoriana, CAE, construidas totalmente en ASTINAVE. Así mismo, se tienen otros casos, como las Lanchas de Apoyo ANCÓN, LIBERTAD Y NEREIDA, propiedad de Petroecuador, cuyo casco es también del mencionado material.

Esta tesis de Grado, tiene como objetivo analizar y evaluar las propiedades anticorrosivas de los cascos de estas embarcaciones. En este caso, se ha decidido evaluar por medio de ensayos de corrosión acelerada, la interacción existente entre el metal base, su junta soldada y la zona afectada por el calor.

En el Capítulo 1, se describirá técnicamente al material y se desarrollarán los conceptos teóricos fundamentales para comprender integrablemente el estudio propuesto.

Tanto la preparación de los cuerpos de prueba de cada zona del Sistema, como el Ensayo en sí, se detallará en el Capítulo 2.

En el Capítulo 3, se expondrán los resultados obtenidos en el ensayo experimental, mientras que teóricamente, se plantearán conceptos termodinámicos y cinéticos que permitirán predecir cuándo ocurrirá una reacción corrosiva en el metal y cuánto durará esta reacción.

Finalmente, se formularán las debidas conclusiones y recomendaciones aplicables en la Construcción Naval.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN………………………………………………………………... II

ÍNDICE GENERAL……………………………………………………… IV

ABREVIATURAS…………………………………………………………... VII

SIMBOLOGÍA………………………………………………………...…… VIII

ÍNDICE DE FIGURAS…………………………………………………... IX

ÍNDICE DE TABLAS…………………………………………………….. XII

Introducción…………………………………………………………...…… 1

CAPÍTULO 1

1. INFLUENCIA NATURALEZA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO UNS-A5083…………………………………………………………..... 2

1.1 Antecedentes Históricos……………………………………………….. 2

1.2 Propiedades de la Aleación 5083……………………………………... 9

1.3 Propiedades de la ZAC y Junta………………………………..……… 16

1.3.1 Zona Afectada por el Calor………………………………..…. 16

1.3.2 Junta Soldada…………………………………………….….. 19

1.3.3 Proceso de Soldadura Aplicado…………………………..… 20

1.4 Comportamiento Corrosivo del Aluminio de uso Naval…… 22

1.4.1 Corrosión en Cascos y Superestructuras……………..…… 23

1.4.2 Corrosión en Circuitos Principales y Auxiliares……. 28

1.4.3 Corrosión del Aluminio en la Junta Soldada……..…. 32

1.5 Cinética, Termodinámica y Principios Teóricos…….…… 33

1.5.1 Generalidades…….. 33

1.5.2 Aspectos Termodinámicos……. 34

1.5.3 Aspectos Cinéticos…….. 39

1.5.4 Medición de la Corriente…….…… 40

1.5.5 Velocidad de Corrosión…….. 43

1.5.6 Principios Teóricos Curvas Potenciostáticas……. 47

CAPÍTULO 2

2. ENSAYOS METALÚRGICOS DE CORROSIÓN…… 56

2.1 Definición del Modelo Experimental…….…..… 56

2.1.1 Probetas o Electrodos de Trabajo…….…….. 57

2.1.2 Equipos…….…….. 63

2.1.3 Metodologías…….…… 69

2.2 Ensayo Cinético de Corrosión del Sistema…….. 77

2.2.1 Gráficas Potenciodinámicas Obtenidas…… 79

CAPÍTULO 3

3 EVALUACIÓN DE RESULTADOS…..... 86

3.1 Análisis y Comparación del Comportamiento Corrosivo…..…. 87

3.2 Tendencias del Estado Pasivo……..……..… 94

3.3 Estimación de la Vida Útil…………..……………………….… 95

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES…………..………………..… 98

Conclusiones…………………………………………….………..……..… 98

Recomendaciones…………………………………….………………..…… 100

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

Ag/AgCl	Electrodo de Plata Cloruro de Plata
a (Mz+)	Actividad del Metal
a (Mo)	Actividad del Ión Metálico
ASTM	Sociedad Americana de Ensayos Metalúrgicos
B	Relación de Pendientes de Tafel
ba	Pendiente de Tafel Anódica
bc	Pendiente de Tafel Catódica
CE	Contraelectrodo
CR	Velocidad de Corrosión
DAQ	Módulo de Adquisición de Datos
DC	Corriente Directa ó Continua
di	Variación pequeña de Corriente
dη	Variación pequeña de Voltaje
Ecorr	Potencial de Corrosión
EM	Potencial Eléctrico de la Interfase
EMo	Potencial Eléctrico Estándar de la Interfase
Eoc	Potencial de Circuito Abierto
Epic	Potencial de Picadura
ER	Electrodo de Referencia
ET	Electrodo de Trabajo
EW	Peso Equivalente
F	Constante de Faraday
GND	Conexión Diferenciada con Referencia a Tierra
i	Corriente que fluye entre ET y CE
icorr	Corriente de Corrosión
LEMAT	Laboratorio de Ensayos de Materiales
MIG	Soldadura con gas inerte de metal
n	Número de Electrones Transferidos
η	Sobrepotencial
Rp	Resistencia a la Polarización
RPL	Resistencia a la Polarización Lineal
SCE	Electrodo Estándar de Calomel
SHE	Electrodo Normal de Hidrógeno
TALAT	Entrenamiento en Aplicaciones y Tecnología del Aluminio
TIG	Soldadura con gas inerte de Tungsteno
USB	Bus Universal en Serie
UNS	Sistema Unificado de Numeración
vs.	Versus
ZAC	Zona Afectada por el Calor

SIMBOLOGÍA

A	Amperios
cm^2	Centímetro Cuadrado
cm^3	Centímetro Cúbico
dm^3	Decímetro Cúbico
g	Gramo
h	Horas
in^2	Pulgadas Cuadradas
J	Joule
°K	Grado Kelvin
Kg	Kilogramo
KS/s	Razón de Muestreo
Log	Logaritmo
mA	Miliamperios
min	Minutos
mm	Milímetros
mmy	Milímetros por Año
mpy	Milésimas de Pulgada por Año
n	Número de electrones transferidos
N	Newton
Ohm	Ohmios
s	Segundo
S	Muestras
V	Voltios
V/Década	Voltios por Década
%	Porcentaje

ÍNDICE DE FIGURAS

			Pág.
Figura	1.1	Construcción de Lanchas UTB. Año 1987……..	4
Figura	1.2	Pruebas Lanchas UTB. Año 1987……...	5
Figura	1.3	Lanchas UTB en Operación. Año 1987…….…..	5
Figura	1.4	Lanchas CAE. Año 2010…..…….……	8
Figura	1.5	Lanchas CAE. Año 2010……..…….……	8
Figura	1.6	Ductilidad, Resistencia a la Tensión……..….	13
Figura	1.7	Módulo de Young, Densidad…..……..….	13
Figura	1.8	Soldabilidad……..….	14
Figura	1.9	Resistencia a la Corrosión, Fatiga…….….....	14
Figura	1.10	Esquema de la Unión Soldada……..….	16
Figura	1.11	Fotografía de la ZAC……...….	17
Figura	1.12	Fotografía de Ataque Corrosivo Aluminio……..…...	22
Figura	1.13	Fotografía de Tubería de Aluminio…….	28
Figura	1.14	Esquema Relación de Corrosión……..….	32
Figura	1.15	Doble Capa Electroquímica…..…….….	33
Figura	1.16	Diagrama de Pourbaix del Aluminio…….….	36
Figura	1.17	Esquema Medición del Potencial Natural……..…	38
Figura	1.18	Corriente de Intercambio……...….	39
Figura	2.1	Fotografía de Corte de Moldes……..……	57

Figura	2.2	Procedimiento de Soldadura WPS…….……	58
Figura	2.5	Proceso de Soldadura WPS……...……	59
Figura	2.4	Primer pase de Soldadura……....	60
Figura	2.5	Último pase de Soldadura……..…….……	60
Figura	2.6	Zonificación de Probetas…….	61
Figura	2.7	Probetas Cortadas y Torneadas……	61
Figura	2.8	Electrodo de Referencia y Contraelectrodo…….	62
Figura	2.9	Potencio-galvanostato de LEMAT…….….	63
Figura	2.10	Diagrama de Bloques……..……	64
Figura	2.11	Esquema de Adquisición de Datos…….……..	65
Figura	2.12	Módulo de Adquisición de Datos……..….	66
Figura	2.13	Salidas del Módulo Adquisición de Datos…..……	67
Figura	2.14	Diagrama de Conexión…….……..…….……	68
Figura	2.15	Preparación de Electrolito……..…..……	69
Figura	2.16	Celda Electroquímica…….....……	70
Figura	2.17	Conexión de Señal Referenciada a Tierra…….....	73
Figura	2.18	Calibración de la Lectura de Datos……..…..…	75
Figura	2.19	Monitoreo con Multímetro Digital……..…..……	76
Figura	2.20	Calibración del Error de la Señal……	76
Figura	2.21	Ilustración de la Celda Electroquímica……..	77
Figura	2.22	Instalación de Equipos…….	78
Figura	2.23	Fotografía de Potencio-galvanostato…….	78

Figura 2.24 Curvas en LabVIEW……..…… 80

Figura 2.25 Curva de Polarización Probeta Metal Base…….. 81

Figura 2.26 Curva de Polarización Probeta ZAC……..... 82

Figura 2.27 Curva de Polarización Probeta ZAC……..... 83

Figura 2.28 Curva de Polarización Probeta Junta……..…. 84

Figura 2.29 Curva de Polarización Probeta Junta……..…. 85

Figura 3.1 Curva de Polarización Probeta Metal……..…. 87

Figura 3.2 Curva de Polarización Probeta ZAC…….. 88

Figura 3.3 Curva de Polarización Probeta Junta…… 89

Figura 3.4 RPL Probeta Metal Base..……..… 90

Figura 3.5 RPL Probeta ZAC…….……..... 91

Figura 3.6 RPL Probeta Junta…….….. 92

Figura 3.7 Resultados icorr Pendiente de Tafel…….. 96

Figura 3.8 Resultados icorr RPL……..……..…..…. 96

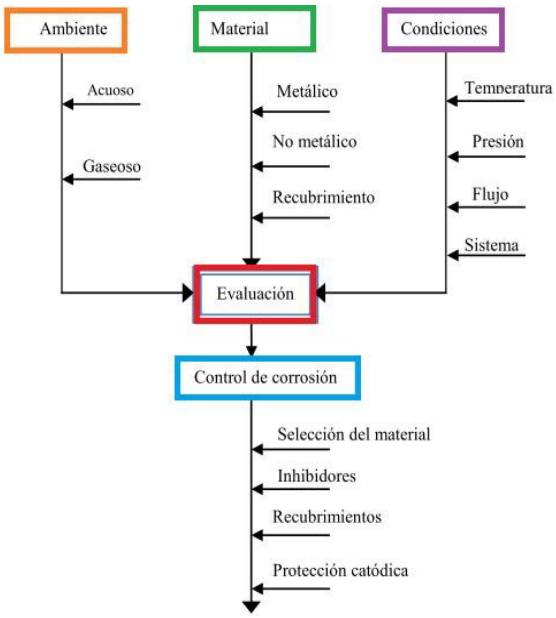
ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla I	Evolución de la Construcción Naval en Aluminio……	6
Tabla II	Designación de las Aleaciones de Aluminio…….....	9
Tabla III	Grados de Templado de las Aleaciones de Aluminio…….	10
Tabla IV	Composición Química del Aluminio UNS-A5083……..……	11
Tabla V	Propiedades Físicas de la Aleación de Aluminio UNS-A5083…	11
Tabla VI	Propiedades Mecánicas de las Aleaciones de Aluminio…….	12
Tabla VII	Propiedades Mecánicas de la ZAC…….	18
Tabla VIII	Resistencia de la Junta Soldada……..……	19
Tabla IX	Parámetros Recomendados para un Proceso Manual MIG…..	20
Tabla X	Factor de Reducción de la Resistencia Estructural……..	21
Tabla XI	Aleaciones de Aluminio utilizadas comúnmente……..….	23
Tabla XII	Electrodos de Referencia Comunes……..…..	37
Tabla XIII	Pesos Equivalentes de las Aleaciones de Aluminio……..…	46
Tabla XIV	Valores de Potencial Natural vs. SCE…..……..….	54
Tabla XV	Resultados obtenidos para icorr…….….	93
Tabla XVI	Valores de Velocidad de Corrosión……..….	95
Tabla XVII	Velocidad de Corrosión en mmy……..…….	97

INTRODUCCIÓN

Las pruebas de Resistencia a la Corrosión, representan la plataforma para la evaluar y controlar este fenómeno natural que está presente en muchas aplicaciones de la ingeniería. Existen factores que interfieren en su evaluación y que según su importancia, fueron detallados por Ashworth en 1984, (ver diagrama adjunto).

Un factor primordial para evaluar y controlar los fenómenos corrosivos es la determinación de la velocidad con que se corroen los metales, por lo tanto, el presente trabajo se enfoca en evaluar y determinar la velocidad de corrosión de la aleación de Aluminio UNS A5083, empleado en la Industria Naval para construir los cascos de embarcaciones, mediante pruebas de laboratorio que permitirán predecir el comportamiento real de esta aleación en agua salada artificial.



CAPÍTULO 1

1. NATURALEZA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO UNS A5083

En este Capítulo se detalla y analiza el marco teórico del presente proyecto.

Se incluye lo siguiente: Antecedentes Históricos sobre el uso del Aluminio en la Construcción Naval Ecuatoriana, las propiedades mecánicas y anticorrosivas de la Aleación de Aluminio UNS A5083 diferenciadas en tres zonas específicas: Aleación - Zona Afectada por el Calor - Junta Soldada.

Se incluye además detalles sobre el Comportamiento Anticorrosivo de esta aleación cuando es usada en Superestructuras y en Circuitos principales y auxiliares.

Adicionalmente, se exponen los principios Cinéticos y Termodinámicos del fenómeno de la Corrosión para finalmente establecer los principios teóricos de las Curvas Potenciostáticas.

1.1. Antecedentes Históricos sobre el uso del Aluminio en la Construcción Naval Ecuatoriana

El año 1987 representa el umbral del uso del aluminio en la construcción naval ecuatoriana. Tiene lugar en el Arsenal Naval, hoy conocido como ASTINAVE, en donde se construyeron cuatro Lanchas Guardacostas, distinguidas como Lanchas UTB.

Se toma como modelo dos unidades similares, construidas en EE-UU (L/Río Mataje, L/Río Puyango).

Bajo el diseño de la Alter Marine (EE-UU), estas Lanchas Guardacostas (L/Río Zarumilla, L/Río Babahoyo, L/Río Daule y L/Río Chone) serían utilizadas para la transportación de personal de combate y para el patrullaje sobre los ríos de la Amazonía ecuatoriana.

Posteriormente, en el año 1990, el Gobierno del Ecuador contrata el diseño y construcción de seis lanchas de transportación fluvial. ASTINAVE construye el casco de acero y la superestructura de Aluminio.

En el año 1991, el aluminio volvería a ser considerado en la construcción naval, pues el Ejército ecuatoriano solicita a ASTINAVE la construcción de 10 lanchas rápidas con capacidad para 18 tripulantes.

En la Tabla I, se muestra la evolución de la construcción naval en aluminio según registros de ASTINAVE.

Las Figuras 1.1 – 1.2 – 1.3, muestran el proceso constructivo del año 1987 de las Lanchas UTB. La Tabla I, detalla la evolución de la construcción en Aluminio según los archivos de ASTINAVE.

FIGURA 1.1 CONSTRUCCIÓN LANCHAS UTB. AÑO 1987

FIGURA 1.2 PRUEBAS PRELIMINARES LANCHAS UTB. AÑO 1987

FIGURA 1.3 LANCHAS UTB EN OPERACIÓN. AÑO 1988

Tabla I
Evolución de la Construcción Naval en Aluminio

AÑO DE CONSTRUCCIÓN	TIPO	ARMADOR	ESLORA (m)	CANTIDAD	GENERALIDADES
1987	UTB	ARMADA DEL ECUADOR	13,42	4	4 LANCHAS PARA COGUAR DE 26 TON. DE DESPLAZAMIENTO, 2 EN EE.UU. Y 4 EN ASTINAVE.
1990	LANCHAS FLUVIALES	GOBIERNO NACIONAL	24,58	6	CASCOS DE ACERO Y SUPERESTRUCTURA DE LUMINIO. CONCTRUÍDAS EN ASTINAVE
1991	PIRAÑA	EJERCITO ECUATORIANO	6,62	10	10 LANCHAS, PARA 18 PASAJEROS
1995	AMAZONAS	ARMADA DEL ECUADOR	7,40	10	10 LANCHAS PARA DIGMER Y CUINMA CON PROTECCION ANTIBALISTICA
1997	FLOPEC II	FLOTA PETROLERA ECUATORIANA	16,00	1	LANCHA DE TRANSPORTE DE PASAJEROS Y CARGA EN EL PUERTO DE ESMERALDAS
1998	VEGA DENEV	SUPER-INTENDENCIA TERMINAL PETROLERO DE BALAO	16,00	2	LANCHA DE TRANSPORTE DE PASAJEROS Y CARGA EN EL PUERTO DE ESMERALDAS
1999	AMAZONAS	A.P.G.	7,40	2	2 LANCHAS MOTORES F/B DE 2X150 HP
2000	AMAZONAS	DINNAV	7,40	3	3 LANCHAS CON PROTECCION ANTIBALISTICA. 2 MOTORES IN/OUT BOARD DE 150 HP
2001	AMAZONAS	CC.FF.AA.	8,10	4	4 LANCHAS, CON PROT. ANTIBALIST. MOTORES IN/OUT BOARD DE 150 HP (PARA ARMADA)

2001	AMAZONAS	CC.FF.AA.	7,40	8	8 LANCHAS, CON PROT. ANTIBALIST. MOTORES F/B DE 150 HP (PARA EL EJERCITO)
2001	SARDINA	SHELL DEL ECUADOR S.A	6,00	1	BOTE DE ALUMINIO, MOTOR FUERA DE BORDA.
2002	NAPO	DINNAV	8,00	1	1 LANCHA , PARA OPERAR EN EL SECTOR DE PUNA CON 2 MOTORES IN/OYT BOARD
2002	RIO JUBONES	DINNAV	5,50	1	BOTE DE ALUMINIO, MOTOR FUERA DE BORDA.
2003	NAPO II	DIGMER	8,15	1	1 LANCHA PARA OPERAR EN RUTA POSORJA-BOYA DE MA. CON 2 MOTORES I DE 150 HP IN/OUT BOARD.
2003	NAPO II	DINNAV	8,15	2	1 LANCHA PARA OPERAR EN RUTA POSORJA-BOYA DE MA. CON 2 MOTORES I DE 150 HP IN/OUT BOARD.
2004	NAPO	DINNAV	8,15	1	1 LANCHA PARA OPERAR EN RUTA POSORJA-BOYA DE MA. CON 2 MOTORES I DE 150 HP IN/OUT BOARD.
2004	NAPO	AUTORIDAD PORTUARIA DE GUAYAQUIL	8,15	2	2 LANCHAS PARA OPERAR EN RUTA POSORJA-BOYA DE MA. CON 2 MOTORES I DE 150 HP IN/OUT BOARD.
2005	NAPO	SUINBA	8,15	1	1 LANCHA DE RESCATE. CON 2 MOTORES I DE 150 HP IN/OUT BOARD.
2005	NAPO	SUINLI	8,15	1	1 LANCHA DE RESCATE. CON 2 MOTORES I DE 150 HP IN/OUT BOARD.
2005	NAPO	SUINSA	8,15	1	1 LANCHA DE RESCATE. CON 2 MOTORES DE 150 HP IN/OUT BOARD.
2005	AMAZONAS	DINNAV	8,10	2	2 LANCHAS DE RESCATE Y PATRULLAJE RIBEREÑO.

2009	LANCHAS DE ALUMINIO	PETRO-ECUADOR	16,00	3	3 LANCHAS PARA AYUDA EN LA NAVEGACIÓN
2010	LANCHAS DE ALUMINIO	CAE	11,00	4	4 LANCHAS PARA PALLAJE EN COSTA ECUATORIANA
2010	LANCHA HIDRO-GRÁFICA	INOCAR	32,83	1	CASCO DE ACERO Y SUPERESTRUCTURA DE ALUMINIO. CONCTRUÍDA EN ASTINAVE

Se tiene un total de 72 embarcaciones de aluminio construidas hasta la actualidad en nuestro país.

Finalmente, las figuras 1.4 – 1.5 muestran las Lanchas: L/Manabí - L/El Oro - L/Los Ríos – L/Guayas, construidas completamente en aluminio y entregadas al Armador en Noviembre del 2010.

FIGURA 1.4 – 1.5 LANCHAS CAE. AÑO 2010

1.2. Propiedades de la Aleación de Aluminio 5083 de uso Naval

Las aleaciones de uso naval, son aquellas designadas bajo el grupo 5xxx, la Tabla II resume la designación estándar de las aleaciones de Aluminio:

Tabla II

Designación de las Aleaciones de Aluminio

		Elemento Mayoritario	Trabajo en Frío	
ALEACIONES FORJADAS	1XXX	(min. 99.00% Al)	X	Aleaciones No Termotratables
	3XXX	Mn	X	
	4XXX	Si	X	
	5XXX	Mg	X	
	2XXX	Cu	(X)	Aleaciones Termotratables
	6XXX	Mg + Si	(X)	
	7XXX	Zn	(X)	
	8XXX	Otro	(X)	

ALEACIONES FUNDIDAS	1XXX0	(min. 99.00% Al)
	2XXX0	Cu
	4XXX0	Si
	5XXX0	Mg
	7XXX0	Zn
	8XXX0	Sn
	9XXX0	Master

Las aleaciones de aluminio se someten a procesos de endurecido o templado para mejorar sus propiedades mecánicas.

Estos procesos involucran trabajo en frío y trabajo en calor, lo que se clasifica a las aleaciones de aluminio como Termo-tratables y No termo-tratables.

Las Aleaciones No Termo tratables, dependen ante todo del trabajo en frío para incrementar sus propiedades de resistencia, mientras que las Aleaciones Termo tratables, pueden ser calentadas después de soldar para restablecer sus propiedades de resistencia.

El trabajo en frío es someter al metal a temperaturas por debajo del punto de recristianización (formación de una nueva estructura granular). El trabajo en frío agrega resistencia y dureza.

Los grados de templado son los mostrados en la Tabla III.

Tabla III

Grados de Templado de las Aleaciones de Aluminio

XXXX	-F	Fabricadas
	-O	Recocido
XXXX	-H1	Trabajo en Frío
	-H2	Trabajo en Frío y Recocido Parcial
	-H3	Trabajo en Frío y estabilizado por tratamiento térmico a baja temperatura
	-HX2	1/4 de endurecido
	-HX4	1/2 de endurecido
	-HX6	3/4 de endurecido
	-HX8	endurecido máximo
		Grado de Trabajo en Frío
XXXX	-T2	Enfriado desde altas temperaturas y envejecida naturalmente
	-T4	Tratadas con "solución de tratamiento térmico" y envejecidas naturalmente
	-T5	Proceso de forjado a altastemperaturas y envejecido artificial
	-T6	Tratadas con "solución de tratamiento térmico" y envejecidas artificialmente
	-T8	Tratadas con "solución de tratamiento térmico" , trabajadas en frío y envejecidas

La aleación de aluminio de uso naval, UNS A5083, tiene la composición química que se muestra en la Tabla IV y las propiedades físicas detalladas en la Tabla V.

Tabla IV

Composición química EN AW- 5083	
Si	0,40
Fe	0,40
Cu	0,10
Mn	0,40-1,0
Mg	4,0-4,9
Cr	0,05-0,25
Zn	0,25
Ti	0,15
Otros (cada uno)	0,05
Otros (en total)	0,15
Aluminio	El resto

Tabla V
Propiedades Físicas de la Aleación de Aluminio 5083

Aleación	5083
Densidad	2.66 x 10^3 kg/m3
Coeficiente medio de expansión térmica (20÷100°C)	23.8 x 10^{-6} por °C
Rango de fundición aproximado	580÷640 °C
Conductividad térmica	117 W/m °C (a 25 °C)
Módulo de elasticidad	71 GPa
Coeficiente de Poisson	0.33
Potencial de solución electrolítica	-0.91 V*

En la Tabla VI se detallan los valores principales de esfuerzo a la tensión de las aleaciones de aluminio, mientras que en el Anexo 3 se presenta un detalle minucioso de las propiedades mecánicas y físicas de la aleación de aluminio de uso naval Al 5083

Tabla VI
Propiedades Mecánicas de las Aleaciones de Aluminio

ALEACIÓN	ITEM	0,2% Prueba de Esfuerzo (N/mm^2)	Resistencia Última a la Tensión (N/mm^2)
5083-O&F	Planchas y Placas	125	270
5083-H321	Planchas y Placas	215	300
5086-O&F	Planchas y Placas	95	240
5086-H112	Planchas y Placas	110	240
5086-H321	Planchas y Placas	195	270
6061-T1	Planchas y Placas	240	290
6061-T6	Extrusiones	240	280
6082-T6	Extrusiones	240	280

La TALAT, en el año 1994, publicó una comparación de las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio.

En las Figuras 1.6 -1.7 -1.8 - 1.9, se muestran las relaciones entre ellas.

FIGURA 1.6.- DUCTILIDAD, RESISTENCIA A LA TENSIÓN, DUREZA Y RESISTENCIA AL IMPACTO.

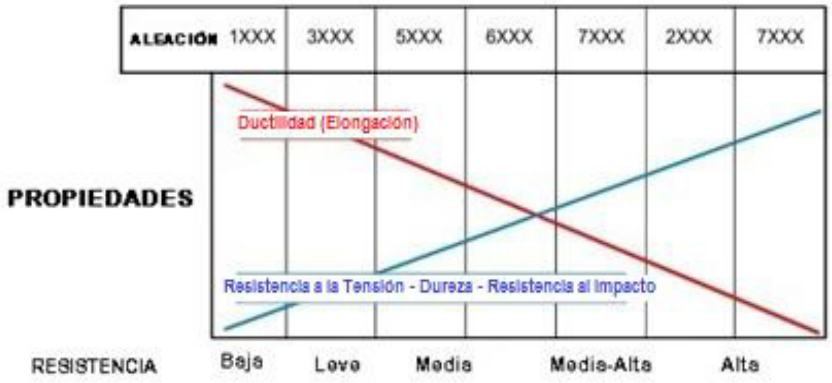


FIGURA 1.7.- MÓDULO DE YOUNG - DENSIDAD

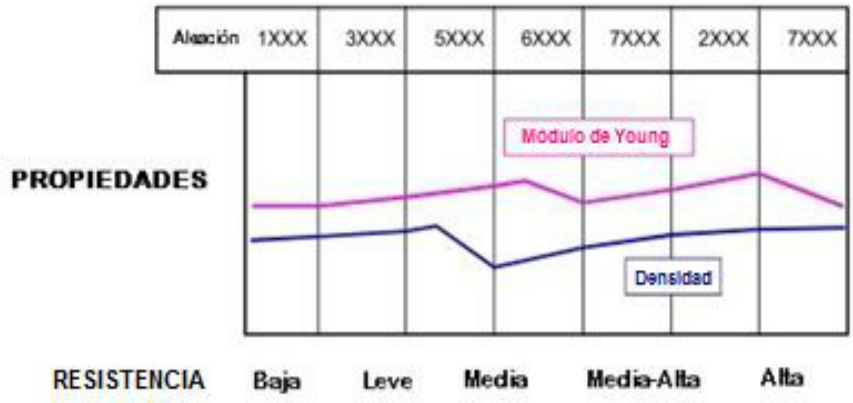


FIGURA 1.8.- SOLDABILIDAD

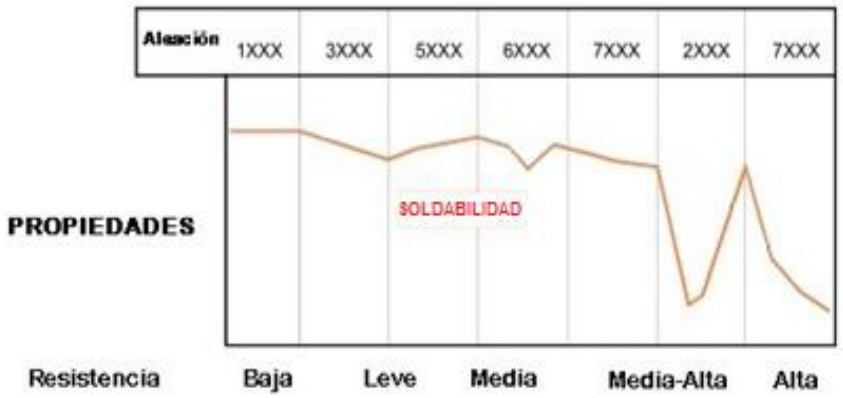


FIGURA 1.9.- RESISTENCIA A LA CORROSIÓN – RESISTENCIA A LA FATIGA

Definiéndose como:

DUCTILIDAD.- Capacidad de un metal para ser estirado o formado sin romperse.

RESISTENCIA A LA TENSIÓN.- Capacidad de un metal para resistir fuerzas que tratan de separarlo o estirarlo.

DUREZA.- Capacidad del material para resistir indentación, penetración y rayado. El calor de la soldadura puede cambiar la dureza de un metal.

RESISTENCIA AL IMPACTO.- Energía necesaria para romper una probeta sometida a una carga de choque.

SOLDABILIDAD.- Capacidad de un material para ser soldado bajo ciertas condiciones impuestas en una estructura específica y apropiada, la cual funciona eficientemente para el uso que se le destina.

RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.- Capacidad de un metal para resistir ataques de otros metales más nobles y de compuestos químicos.

De acuerdo a las figuras, se puede concluir que las aleaciones 5xxx, de uso Naval, presentan la mejor combinación de resistencia estructural, resistencia a la corrosión y soldabilidad que se podría esperar de todas los tipos de Aleaciones de Aluminio No Termo-tratables existentes.

1.3. Propiedades de la Zona Afecta por el Calor y de la Junta Soldada

Las propiedades de la Zona afectada por el Calor y la Junta Soldada se detallan a continuación.

1.3.1. Zona Afectada por el Calor

La Zona Afectada por el Calor es una fracción del metal base que no ha sido fundida, pero cuyas propiedades mecánicas han sido alteradas por el calor de la soldadura.

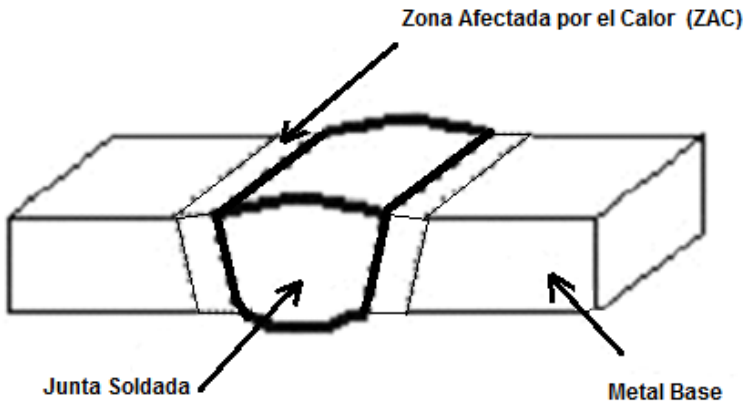


FIGURA 1.10.- ESQUEMA DE UNÓN SOLDADA

Dependiendo de la difusividad térmica del metal base, la velocidad de enfriamiento del metal será alta ó baja. Si es alta, la ZAC será pequeña.

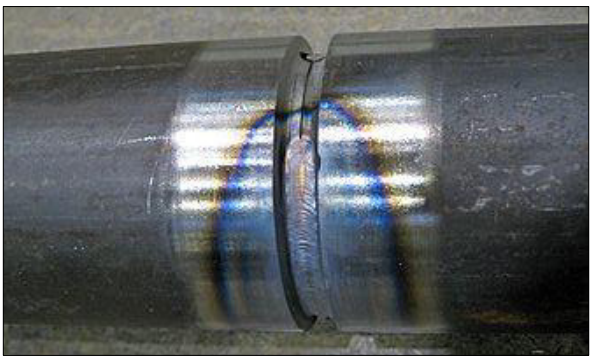


FIGURA 1.11.- FOTOGRAFÍA DE LA ZONA AFETADA POR EL CALOR DE LA UNIÓN SOLDADA DE TUBERÍAS DE ACERO.

A pesar de que las aleaciones de aluminio de uso naval presentan una excelente soldabilidad, se ven afectadas en sus propiedades mecánicas precisamente en la zona afectada por el calor.

Los valores mínimos de Esfuerzo de Fluencia $\mathbf{F_o}$, Resistencia Última $\mathbf{f_a}$ y Resistencia de Zona Afectada por el Calor $\mathbf{f_{zac}}$, para algunas aleaciones de Aluminio, se muestran en la Tabla VII.

Tabla VII

Propiedades Mecánicas de la ZAC

Aleación	Grado de Templado	ITEM	ESPESOR (mm)		F_o	f_a	f_{zac}	A_{50}
			Desde	Hasta	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	%
5083	O / H111	Plancha	2	80	115	270	270	14
	F / H112	Refuerzo		200	110	270	270	12
	H24 / H34	Plancha	2	25	250	340	272	4
	H24 / H34	Refuerzo		5	235	300	240	4
6005 A	T6	Refuerzo		25	200	250	163	8
6063	T6	Refuerzo		20	170	215	140	8
6082	T4	Plancha	4	12	110	205	205	12
		Refuerzo		25	110	205	205	14
	T6	Plancha	4	125	255	300	195	6
		Refuerzo	5	150	250	290	190	8

1.3.2. Junta Soldada

Se denomina como Junta Soldada, al cordón de soldadura que empata dos materiales metálicos, ya sea con aporte de material o sin aporte de material.

El material de aporte que se usa en la junta soldada de las aleaciones de aluminio 5xxx, por lo general es la aleación 5356.

La Tabla VIII muestra los valores característicos de esfuerzo para las juntas soldadas con soldadura 5356 y 4043 como material de aporte.

Tabla VIII

Resistencia Característica fw de la Junta Soldada

	Resistencia fw (N/mm^2)		
Material de Aporte	**5356**	**4043**	**Aleación**
	-	95	3103
	170	-	5052
	240	-	5083
	220	-	5454
	160	150	6060
	180	160	6005
	190	170	6061
	210	190	6082
	260	210	7020

Si se usa como metal de aporte el 5056, 5556 ó 5183, se debe aplicar los valores de la aleación 5356 de la Tabla VIII.

1.3.3. Proceso de Soldadura Aplicado

Existen dos procesos para soldar aleaciones de aluminio, el proceso MIG y el proceso TIG. Según la Tabla IX, la TALAT recomiendan los siguientes valores para un proceso manual de soldadura MIG.

Tabla IX

Parámetros Recomendados para un Proceso Manual MIG

Espesor de la Pieza de Trabajo (mm)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Diámetro del Alambre (mm)	Velocidad de Soldado (cm/min)	Consumo de Argón (dm3/min)	Número de Pases
4	180	22	1,2	90	15	1
6	200	23	1,2	80	15	1
8	240	23	1,2	75	16	1
10	260	24	1,6	70	18	2
15	270	24	1,6	65	20	4-6
20	270	24	1,6	60	20	4-8
25	280	25	1,6	60	20	4-10

Es importante mencionar que la reducción en la resistencia estructural en las vecindades de la junta soldada depende del proceso de soldadura que se utilice. La Tabla X muestra los valores **ρzac** que representan la reducción de la resistencia estructural según el proceso de soldadura que se aplique.

Tabla X

Factor de Reducción de la Resistencia Estructural según el Proceso de Soldadura Aplicado

	Serie	Condición	ρzac MIG	ρzac TIG	
Para perfiles extruidos, planchas, placas, tubos y forjados de las diferentes aleaciones en la condición O y F la **ρ haz = 1,00**	6XXX	T4	1	-	Para Templados T4, T5 y T6 de perfiles extruidos, planchas, placas y tubos
		T5	0,65	0,60	
		T6	0,65	0,50	
	7XXX	T6	0,80 **a** 1,00 **b**	0,60 **a** 0,80 **b**	
	5XXX	H22	0,86	0,86	Para condición H de trabajo en frío en planchas, placas y forjados.
		H24	0,80	0,80	
	3XXX	H14 – 16 – 18	0,60	0,60	
	1XXX	H14	0,60	0,60	

Los indicadores a y b se aplican para lo siguiente:

a: Cuando se aplica un esfuerzo tensional que actúa transversalmente a una junta soldada a tope ó filete.

b: Se aplica para todas las condiciones de esfuerzo, por ejemplo, esfuerzo longitudinal, esfuerzo transversal a compresión o esfuerzo cortante.

1.4. Comportamiento Corrosivo del Aluminio de Uso Naval

El Aluminio es utilizado en la construcción de Cascos, Superestructuras, Circuitos Principales, Auxiliares, etc.

En el presente subcapítulo sintetiza el comportamiento ante la corrosión en ambientes marinos de las Aleaciones de Aluminio en aplicaciones navales. [2]

FIGURA 1.12.- FOTOGRAFÍA DE ATAQUE CORROSIVO EN CAMISA DE ALUMINIO DEL EJE PROPULSOR

1.4.1 Corrosión del Aluminio en Cascos y Superestructura [(2)]

Las aleaciones que por lo general son usadas en cascos y superestructuras son:

Tabla XI

Aleaciones de Aluminio utilizadas comúnmente

5083-5086	Planchaje Casco y Superestructura
5456	Para perfilerías soldadas
6061	Para: • Perfilería en construcciones remachadas • Tubos estructurales (puntales) soldados ó remachados • Piezas Forjadas, Pernos.
6053	Remaches

La superficie de la plancha de aluminio que ha sido atacada corrosivamente, se tornará áspera al tacto y tendrá una coloración gris oscura. Con el paso del tiempo, la superficie de la plancha expuesta a la atmósfera marina, acumulará una pasta blanca, producto de la corrosión. Si se retira este producto por medio de un lavado de la superficie, se apreciarán fácilmente las picaduras formadas.

Ampollas: Se producen en las planchas pintadas cuando cubren uniones bimetálicas incorrectamente diseñadas, y también cuando

la pintura se aplica sobre grietas. Un correcto plan de pintura deberá tener una vida útil de 5 años en ambiente marino.

Corrosión por Grietas: En el interior de los cascos de aluminio, bajo el nivel de la sentina, donde podría acumularse el agua, tierra entre otros residuos, se debe aplicar una capa de pintura para prevenir la corrosión por grietas.

Este recubrimiento no se necesita si se limpia regularmente la sentina y donde los espesores sean del orden de 0,5 pulgadas.

La condensación dentro de los cascos y superestructuras sin aislamiento, puede humedecer las superficies interiores sin que ocurra un ataque corrosivo, sin embargo, donde existan áreas con aislamiento, la condensación humedece el aislamiento y en estos casos, ocurre el ataque del tipo “poultice” que varía de muy ligero a severo según el caso; es por lo tanto recomendable, pintar todas las superficies interiores del aluminio que están cubiertas con aislamiento no adhesivo.

Estibas: Es muy poco probable que los pisos interiores de aluminio desnudo, como la estiba de sala de máquinas, pasillos y rejillas, sufran corrosión.

Bajo tapetes o alfombras de látex alcalinas, se deben usar compuestos vinílicos resistentes.

Uso de Otros Metales: Si se usan otros metales, es preferible usar acero inoxidable, desde el punto de vista galvánico; y si la junta acero inoxidable-aluminio, está bien aislada, provocará poco ataque galvánico. Si se pinta al aluminio, los accesorios de cubierta de acero inoxidable también deben ser pintados.

Se puede utilizar accesorios de acero para cascos de aluminio, pero previniendo cuidadosamente el diseño del ensamble y de las juntas acero-aluminio.

Las juntas deben aislarse completamente usando empaques inertes, anillos planos, pernos, camisas para pernos, etc. Se debe demostrar que no hay flujo de corriente mediante una lectura con amperímetro

Corrosión galvánica: Cuando ocurre ataque galvánico, en nuestro medio la tendencia es proteger con pintura la superficie que se está corroyendo, pero esto sólo empeora las cosas, pues logra que la superficie de corrosión sea más pequeña, y por esta área pequeña debe pasar la misma cantidad de corriente eléctrica que corroía el área más grande, y, la corrosión galvánica será más concentrada. De otra manera, si los accesorios de acero están pintados, la corriente eléctrica es bloqueada y no se produce corrosión galvánica.

Es necesario el uso de protección catódica para ejes y hélices en los cuales se usa materiales como aleaciones de cobre y aleaciones de níquel, que no se pueden pintar.

Dentro del casco, todos los accesorios que no son de aluminio y que están bajo la línea de sentina, deben ser pintados para evitar corrosión galvánica.

Casco de Acero – Superestructura de Aluminio:

Las conexiones entre superestructuras de aluminio y cascos de acero deben ser diseñados para prevenir la corrosión galvánica durante la vida útil del barco. Se recomienda lo siguiente:

a.- Diseñar la junta para que difunda el agua del lado abierto a la intemperie.

b.- Diseñar la junta unas pulgadas arriba de la cubierta de acero para prevenir que el agua se recoja contra ella.

c.- Diseñar la junta de manera que esta no sea revestida por ningún recubrimiento de cubierta.

d.- Usar un empaque inerte no-absorbente, neutro o inhibidor para separar los dos metales

e.- Si se usan sujetadores de acero inoxidable, deberán ser preferentemente aluminizados.

f.- Pintar la junta de ambos lados y mantener regularmente la pintura del lado expuesto a la intemperie.

El literal **c** debe ser considerado para los mamparos interiores de inodoros, cuartos de limpieza, duchas, etc. Donde se aplica cemento y azulejos, una junta bimetálica enterrada en cemento podría sufrir ataque galvánico.

En el interior y exterior de las superestructuras, y el interior de los cascos, hay muchos lugares donde el acero, cobre, bronce, monel (aleación de cobre-níquel) o plomo se acoplan inevitablemente a la estructura de aluminio. Cada uno de estas conexiones debe ser aislada con un empaque adecuado y se debe usar un tipo correcto de soportería. La corrosión galvánica ocurre en soportes, abrazaderas, bandejas para cables eléctricos con armadura de cobre y plomo, cajetines eléctricos de acero o bronce, y otros equipos sobre cubierta. Aunque no existirá un ataque severo, producirá molestia si las juntas son mal diseñadas o reparadas inapropiadamente.

1.4.2 Corrosión del Aluminio en los Circuitos Principales y Auxiliares [2]

FIGURA 1.13.- FOTOGRAFPIA DE TUBERÍA DE ALUMINIO DE UN CIRCUITO HIDRÁULICO

Por lo general se consideran dos aspectos: la resistencia a la corrosión de la aleación de aluminio al líquido que transporta, y, la presencia de accesorios metálicos distintos al aluminio cuando el fluido del circuito es electrolítico.

En este último aspecto, el uso de aleaciones de cobre en bombas, intercambiadores de calor, etc., produce ataque galvánico severo. Si hay desprendimiento de partículas de cobre, se produce ataque por deposición en la tubería de aluminio. Comúnmente, la corrosión galvánica se previene mediante aislamientos adecuados y la corrosión por deposición mediante la correcta elección del tipo de aleación de los accesorios del circuito.

La corrosión que se presenta en los circuitos Principales y Auxiliares de una embarcación es la siguiente:

Circuitos de Aceites.- Generalmente se produce corrosión en los circuitos de aceite cuando hay presencia de humedad en el mismo y ésta se asienta o precipita en las partes bajas del sistema de tuberías. Esto tiene importancia para los circuitos cuyos espesores son pequeños y que tienen accesorios de cobre. Para evitar la acumulación de humedad en las partes bajas, es importante colocar drenajes en estas zonas, o en su defecto, usar espesores de mayor dimensión.

Circuitos de Combustible La corrosión que se produce en la tubería de aluminio de un circuito de combustible es despreciable, pues los productos derivados del petróleo son malos conductores eléctricos. Esto significa que hay poco riesgo de corrosión galvánica, incluso si el circuito de tuberías está compuesto por varios tipos de metales.

Circuitos de Vapor.- Cuando se trata de vapor seco, no hay posibilidad de ataque corrosivo. Si el vapor está húmedo y el circuito tiene accesorios de aleaciones de cobre, hay posibilidad de corrosión por deposición. Es importante utilizar los accesorios

de cobre en las partes altas del circuito o incorporar trampas en U en las tuberías de aluminio para que los depósitos de cobre se alojen solamente en esta zona.

Circuitos de Agua Dulce.- El agua dulce sin mayores concentraciones de minerales, ataca al aluminio de manera superficial, un ejemplo de esto es el agua de los sistemas de destilación, así como las aguas de los puertos. Aguas muy duras, especialmente aquellas que llevan disueltas sales de metales pesados, son muy corrosivas. El uso de cloro debe ser limitado a 2ppm, mientras que para la limpieza del circuito pueden ser usadas sustancias de compuestos cuaternarios de amonio.

Sentinas.- El agua de las sentinas tiene el mismo efecto sobre el aluminio que el agua salada.

Circuitos de Agua Salada.- El agua salada produce picaduras sobre el aluminio, es recomendable utilizar tuberías de aluminio revestidas. Las uniones entre tuberías, válvulas, bombas, etc., deben estar debidamente aisladas mediante empaques inertes o piezas separadoras de caucho, puesto que el ataque galvánico es severo. A pesar de estas precauciones, es posible que haya continuidad y la corriente pase a través de las soporterías; esto

sin embargo, no es severo, al menos si el camino de la corriente es extenso y la resistencia eléctrica es alta. No está de más aislar las soporterías del circuito de agua salada.

Si se utilizan tuberías roscadas, éstas no pueden ser aisladas y por lo tanto son muy poco apropiadas para circuitos de agua salada que tengan accesorios metálicos diferentes.

No utilizar soldadura para empatar uniones de tuberías de metales diferentes. Lo recomendable es aislar las partes mediante bridas y empaques de caucho.

Cuando existe la necesidad de reemplazar piezas del circuito de aluminio, se debe tener cuidado especial en que la pieza reemplazante sea del mismo material, puesto que las diferentes aleaciones de aluminio tienen un aspecto muy similar y no pueden ser diferenciadas por inspección visual. Utilizar únicamente en reparaciones de emergencia aleaciones de aluminio de composición desconocida, y reemplazarlas en la primera oportunidad.

1.4.3 Corrosión del Aluminio en Junta Soldada

La junta soldada, la Zona Afectada por el Calor, ZAC, y el Metal Base, deben tener la siguiente relación de corriente de corrosión de Cátodo sobre Ánodo, C/A:

C/A
- **≥ 1 , entonces la Velocidad de Corrosión es alta.**
- **< 1 , entonces la Velocidad de Corrosión es baja.**

Si el cordón de soldadura actúa como cátodo, y como ánodo, el metal base; este último protegerá al cordón de soldadura.
Si por el contrario, el cátodo es el metal base y el ánodo es el cordón, este último se corroerá protegiendo al metal base.

Lo que se requiere es que el Cordón actúe siempre como cátodo y el Metal Base como ánodo. Esto se representa en la Fig. 1.14.

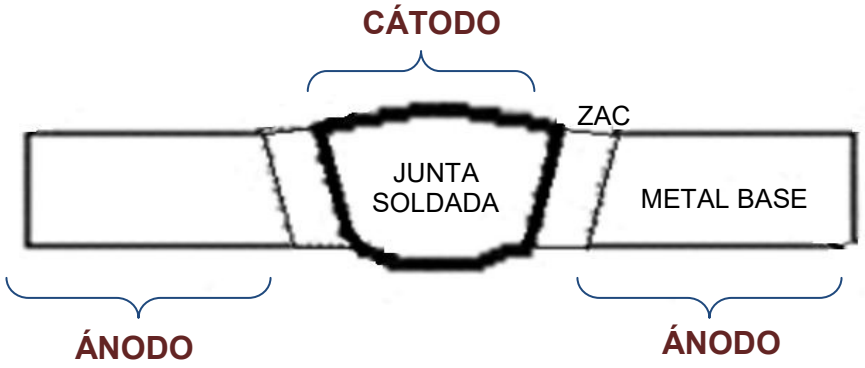


FIGURA 1.14.- ESQUEMA RELACIÓN DE CORROSIÓN

1.5. Cinética, Termodinámica y Principios Teóricos de las Curvas Potenciostáticas [1]

1.5.1.- Generalidades:

Un metal que está contacto con un medio electrolítico acuoso, da inicio a un proceso de ordenamiento de las cargas eléctricas. Los electrones libres del metal, modifican el espacio eléctrico y generan una interacción con iones y masa en los alrededores del metal.

Se representa gráficamente, en la Fig. 1.15, la formación eléctrica de esta interfase, diferenciando dos capas principales, denominada la doble capa electroquímica o interfase de Helmholtz Hermann Ludwing Ferdinand Von Helmholtz 1821 – 1894, publicado en 1879.

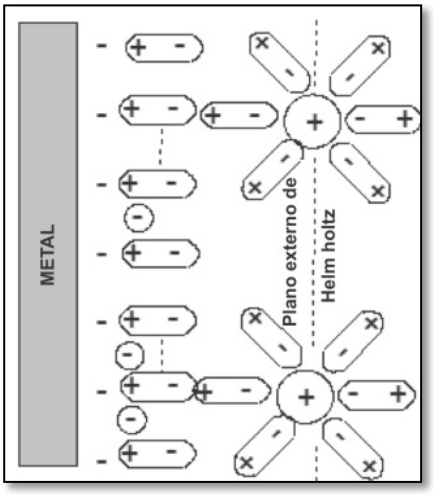


FIGURA 1.15.- DOBLE CAPA ELECTROQUÍMICA [4]

Todas estas cargas distribuidas en el espacio, generan un campo eléctrico ó *potencial eléctrico* en la vecindad del metal ó electrodo de trabajo (ET).

1.5.2.- Aspectos Termodinámicos.

Existen conceptos fundamentales que nos permiten precisar termodinámicamente si una reacción ocurrirá o no. Estos conceptos son: Ecuación de Nernst, Diagrama de Pourbaix y Potencial Eléctrico (E),

Ecuación de Nernst

Nernst, determinó la relación entre la cantidad de cargas de la interfase metal-medio y el valor en voltios de ésta. Esta ecuación es conocida como ecuación de Nernst:

$$E_M = E_M^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a^{(M^{Z+})}}{a^{(M^o)}} \qquad (1)$$

Donde,

R: Constante Universal de los gases (8,31 J/M – °K).

T: Temperatura (° K).

F: Constante de Faraday (aprox. 96.500 Culombios).

n: Número de electrones transferidos en los procesos de óxido/reducción.

EM: Potencial eléctrico en la interfase (Voltios).

EMo: Potencial eléctrico en la interfase en condiciones estándar (Voltios).

a (Mz+): Actividad del ión metálico.

a (Mo): Actividad del metal (se toma como 1).

Diagrama de Pourbaix

Marcel Pourbaix, (1904-1998), a partir de esta ecuación, definió la relación Potencial-pH. Estos diagramas determinan el comportamiento de los metales en función del pH del medio que lo contiene.

Existe un Diagrama de Pourbaix para cada metal, y permite establecer la tendencia que tiene el metal para volver a su estado de mínima energía, según las condiciones del medio.

El Diagrama de Pourbaix para el aluminio se muestra en la Figura 1.16. Como se puede observar en este diagrama, conociendo el potencial y el pH, se puede determinar si el metal se oxida, se Pasiva o si está en estado de Inmunidad.

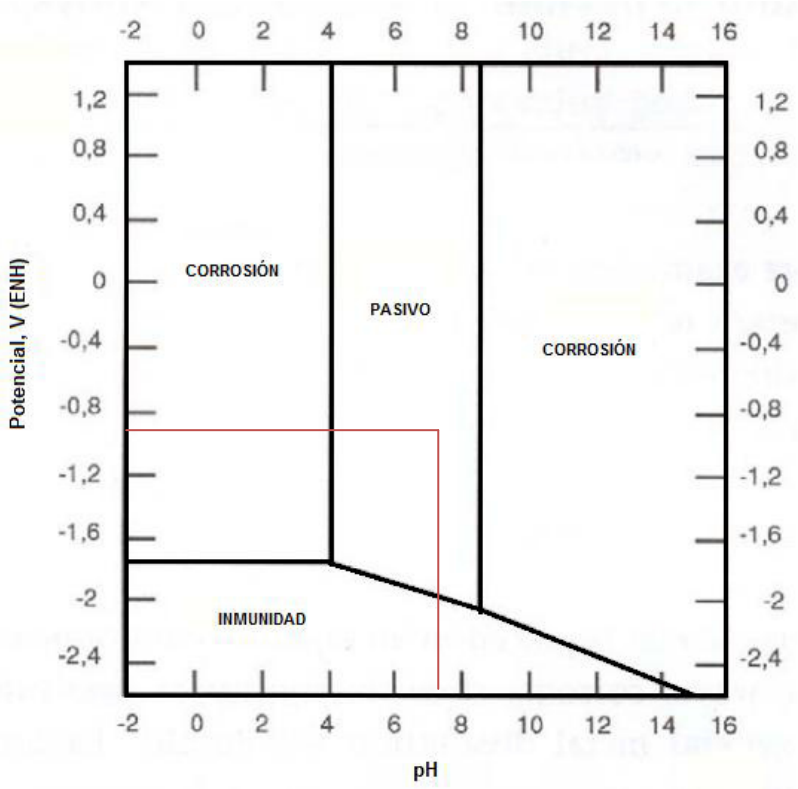


FIGURA 1.16.- DIAGRAMA DE POURBAIX DEL ALUMINIO

Según la Tabla XIV el Potencial Natural del Aluminio es -0,87V. El agua del mar tiene un pH de 7.5 aproximadamente.

Con estos datos se observa en el diagrama que el Aluminio se encuentra en la Zona Pasiva.

Con valores de pH mayores a 8 y menores que 4, es decir, en la zona alcalina y ácida respectivamente, y con un potencial de -0,87V, el Aluminio se encuentra en la zona corrosiva, es decir, en términos termodinámicos, el aluminio se corroerá por encontrarse en la Zona Activa de Corrosión.

Potencial Eléctrico

El potencial eléctrico es una medición diferencial entre dos puntos del espacio; para medir el potencial de una superficie se utiliza un punto de referencia, o un nivel cero asumido.

El electrodo de referencia es un metal en condiciones especiales de estabilidad y de carga, de tal manera que las cargas debido a su interacción con el medio, no varían, por lo tanto cualquier variación que se presentare, son debido a variaciones de otro metal (electrodo de trabajo). Un electrodo de referencia común, es el de Plata/ Cloruro de Plata (Ag/AgCl), que es el utilizado en el presente trabajo.

En la Tabla XII, se indica los electrodos de referencia comúnmente usados.

Tabla XII

Electrodos de Referencia Comunes

Electrodo	Reacción de Media Celda	Potencial V vs. SHE
Mercurio/Sulfato Mercurioso	$HgSO_4 + 2e^- = 2Hg + SO_4^{2-}$	+ 0.615
Cobre/Sulfato de Cobre	$CuSO_4 + 2e^- = Cu + SO_4^{2-}$	+ 0.318
Calomel Saturado (SCE)	$Hg_2Cl_2 + 2e^- = 2Hg + 2Cl^-$	+ 0.241
Plata/Cloruro de Plata	$AgCl + e^- = Ag + Cl^-$	+ 0.222
Hidrogeno Estándar (SHE)	$2H^+ + 2e^- = H_2$	0.000

La forma de medir el potencial eléctrico es utilizando un voltímetro de alta resistencia de entrada, para evitar la polarización del electrodo de referencia.

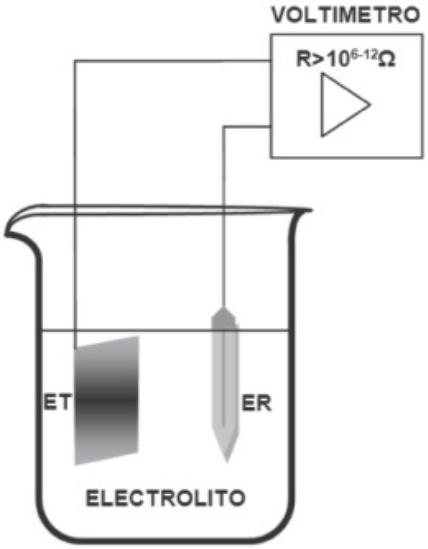


FIGURA 1.17.- ESQUEMA DE MEDICIÓN DEL POTENCIAL NATURAL [4]

1.5.3.- Aspectos Cinéticos

La cinética está definida por la corriente que se genera y se mide en la interfase metal-medio.

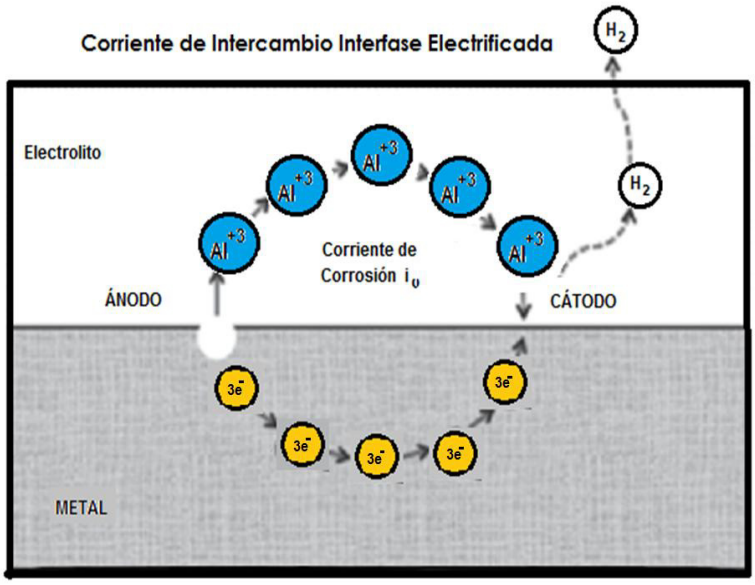


FIGURA 1.18.- CORRIENTE DE INTERCAMBIO (4)

La velocidad con que ocurre la transferencia de iones y electrones representa la velocidad de las reacciones de óxido/reducción de la interfase del ET y por tanto, de la velocidad de corrosión de un metal. Dependiendo del medio en que se encuentre el material, principalmente se dan dos tipos de reacciones de oxido/reducción:

- Reacción de desprendimiento de Hidrógeno:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

- Reacción de reducción del ión aluminio:

$$Al^{3+} + 3\,e^{-} \rightarrow Al$$

- Reacción de reducción del Oxígeno:

$$O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$$

En la figura 1.18 se presenta el mecanismo que ocurre en un proceso de óxido/reducción en la interfase metal/electrolito. Existe una corriente neta negativa de electrones y una positiva de los iones del electrolito, que generan una corriente de corrosión, icorr.

1.5.4.- Medición de la corriente eléctrica en una interfase

Para medir la corriente eléctrica en la interfase, es necesario polarizar la misma. Para ellos se utiliza una celda electroquímica, donde se utiliza un contraelectrodo o electrodo inerte, generalmente de platino, que tiene la función de transmitir corriente. En el presente ensayo se utilizó como contraelectrodos dos varillas de acero inoxidable.

Para completar la celda electroquímica, se debe incorporar una fuente de voltaje y corriente; esta fuente se denomina Potenciostato. El Potenciostato impulsa o retira electrones de la

probeta de trabajo. En la figura 1.19 se observa un esquema de lo mencionado.

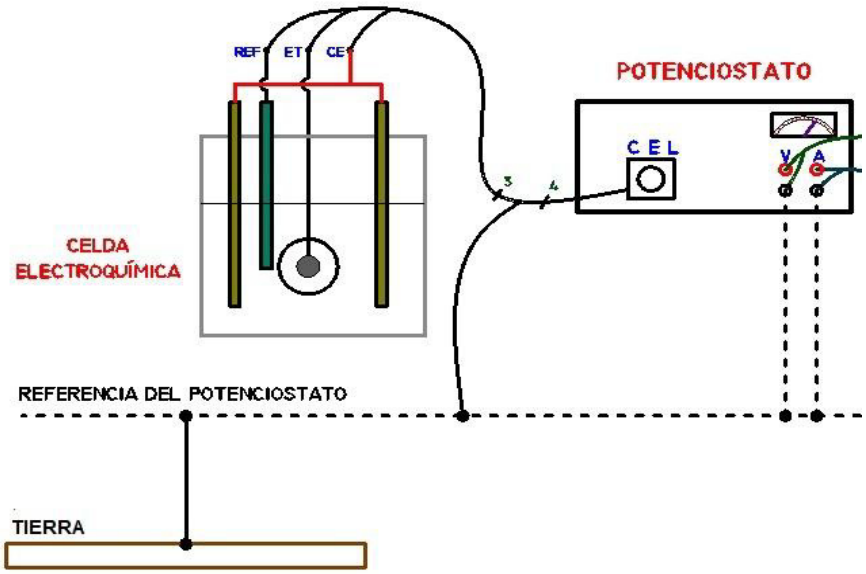


FIGURA 1.19.- ESQUEMA CELDA ELECTROQUÍMICA

Donde,

ET: Electrodo de trabajo.

ER: electrodo de referencia.

CE: contra electrodo.

Si el potenciostato polariza la celda electroquímica de tal forma que saca los electrones del contraelectrodo impulsándolos hacia la probeta de trabajo, se llevan a cabo reacciones de reducción sobre el ET. Si en caso contrario, saca electrones de la probeta

de trabajo para enviarlos al contraelectrodo, las reacciones sobre el ET, son de oxidación.

La ecuación que describe este mecanismo y es conocido como ecuación de Butler- Volmer.

$$i = i_o \left(e^{\left[-\frac{bF\eta}{RT}\right]} - e^{\left[\frac{(1-b)F\eta}{RT}\right]} \right) \qquad (2)$$

Donde,

i: Corriente que fluye entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo (A).

icorr: Corriente de intercambio (A).

b: Pendientes de Tafel (mV/A).

F: Constante de Faraday (96500 C/mol).

R: Constante Universal de los gases (8.31 J/mol - o K).

T: Temperatura (°K).

η : Sobrepotencial o potencial de polarización (V).

La ecuación η= E-Ecorr, describe la relación entre voltaje y corriente que ocurre en la interfase del material en un rango de voltajes determinado.

1.5.5.- Velocidad de Corrosión

La Ley de Ohm expresa que, si hay diferencia de potencial eléctrico, hay flujo de corriente. De esta manera medimos la velocidad de corrosión utilizando un electrodo de referencia (Potencial conocido) y midiendo la diferencia de potencial del circuito.

La diferencia de Potencial Eléctrico, de acuerdo a la Ley de Faraday, está en función de la cantidad de corriente por unidad de tiempo que fluye por un conductor y por la resistencia al flujo de la corriente que posea dicho conductor. Por ejemplo, cuando un electrodo metálico o de aleación, en este caso el aluminio 5083, es inmerso en un líquido electrolíticamente conductivo con suficiente poder oxidante, como el agua salada artificial, éste se empezará a corroer a través de un fenómeno electroquímico. Este proceso involucra dos reacciones simultáneas y complementarias, una anódica y una catódica.

En la zona anódica, los iones metálicos serán atraídos a la superficie debido a la diferencia de potencial, los iones metálicos emigrarán hacia la solución, y de esta forma, se deja un excedente de electrones en la superficie de la aleación. El exceso de electrones fluirá a las zonas cercanas adyacentes,

designadas como áreas catódicas, las cuales serán oxidadas por los agentes oxidantes del líquido corrosivo.

La corriente de corrosión icorr, generada del flujo de electrones de la zona anódica a la catódica.

Se define las siguientes ecuaciones de velocidad de corrosión:

$$CR = 0.129 * \frac{EW * icorr}{\rho} \qquad (3)$$

Donde,

CR = Velocidad de Corrosión [MPY]

EW = Peso Equivalente. (Tabla XIII)

icorr = Corriente de Corrosión. [μA/cm2]

ρ = Densidad del metal [g/cm3],

F = Constante de Faraday 96500 [A.s/mol]

Para obtener unidades de penetración [mpy], se divide la velocidad de corrosión entre la densidad [g/cm3].

La velocidad de corrosión CR, o también llamada Tasa de Corrosión, representa la velocidad de corrosión que ha sufrido un material en unidad de masa con respecto a su superficie en el tiempo.

La velocidad de corrosión también puede expresarse en función de la penetración por unidad de tiempo MPY (milésimas de pulgada por año).

$$mpy = \frac{534W}{\rho A t} \qquad (4)$$

Donde,

W = Pérdida de masa [mg]

ρ = Densidad [g/cm3],

A = Área en [in2] o [cm2]

t = Tiempo en horas [h]

Para calcular la velocidad de corrosión de las aleaciones, es necesario conocer su número equivalente, que es la sumatoria de las fracciones del peso atómico y número atómico de todos los elementos químicos que conforman la aleación. Tabla XIII.

Tabla XIII [1]

Pesos Equivalentes Aleaciones de Aluminio

Designación Común	UNS	w Elementos / Valencia Constante	Menor Valencia Variable	Menor Peso Equivalente
Aleaciones de Aluminio				
AA1100	A91100	Al/3		8.99
AA2024	A92024	Al/3, Mg/2	Cu/1	9.38
AA2219	A92219	Al/3	Cu/1	9.51
AA3003	A93003	Al/3	Mn/2	9.07
AA3004	A93004	Al/3, Mg/2	Mn/2	9.09
AA5005	A95005	Al/3, Mg/2		9.01
AA5050	A95050	Al/3, Mg/2		9.03
AA5052	A95052	Al/3, Mg/2		9.05
AA5083	A95083	Al/3, Mg/2		9.09
AA5086	A95086	Al/3, Mg/2		9.09
AA5154	A95154	Al/3, Mg/2		9.08
AA5454	A95454	Al/3, Mg/2		9.06
AA5456	A95456	Al/3, Mg/2		9.11
AA6061	A96061	Al/3, Mg/2		9.01
AA6070	A96070	Al/3, Mg/2, Si/4		8.98
AA6101	A96161	Al/3		8.99
AA7072	A97072	Al/3, Zn/2		9.06
AA7075	A97075	Al/3, Zn/2, Mg/2	Cu/1	9.58
AA7079	A97079	Al/3, Zn/2, Mg/2		9.37
AA7178	A97178	Al/3, Zn/2, Mg/2	Cu/1	9.71
Aleaciones de Cobre				
CDA110	C11000		Cu/1	63.55
CDA220	C22000	Zn/2	Cu/1	58.07
CDA230	C23000	Zn/2	Cu/1	55.65

1.5.6.- Principios Teóricos de las Curvas Potenciostáticas

Para poder medir la velocidad de corrosión de un sistema, es necesario conocer lo que se denomina Curvas de Polarización. En el presente trabajo, se desarrollarán las Curvas de Polarización Potenciodinámicas de la Aleación de Aluminio 5083.

Corrosión Electroquímica

El uso del aluminio en medios salinos-acuosos, o en atmósferas marinas, da lugar a la manifestación de fenómenos corrosivos. Estos fenómenos pueden ser explicados en términos de las reacciones electroquímicas que generan en estos procesos, los metales involucrados liberan iones que retiran mecánicamente la capa de pasivación que protege al metal.

Polarización:

Polarizar es variar, mediante un flujo de corriente, el potencial natural de un metal. Esta perturbación puede ser anódica ó catódica. Evans, en 1929, representó en un Diagrama la variación del Potencial vs. Corriente; generándose un Potencial de Oxidación y un Potencial de Reducción

Curvas Potenciostáticas – Potenciodinámicas

La curva de Polarización Potenciostática o Potenciodinámica, relacionan Potencial vs Densidad de Corriente, y se obtienen a partir de un barrido estático ó dinámico de potenciales para posteriormente leer el valor de la corriente de respuesta mediante un equipo electrónico llamado Potenciogalvanostato.

Con las medidas de la relación Potencial-corriente, se calculan tasas de corrosión, pasividad de la capa protectora, tendencia a la picadura etc.

La polarización anódica potenciodinámica caracteriza a una probeta del metal de estudio por medio de su relación Potencial-Corriente. El potencial es escaneado en la dirección positiva, en la cual actúa de manera anódica corroyéndose y formando una capa de óxido. Estas medidas son usadas para determinar las características corrosivas del metal de estudio, en este caso la aleación de aluminio Al5083, en soluciones que simulan ambiente marino.

Medición de la Polarización Potenciodinámica

Cuando la probeta de trabajo es inmersa en un medio corrosivo, ocurren en su superficie dos procesos: oxidación y reducción. Si el metal está en contacto con ambientes corrosivos, asume un potencial de corrosión Ecorr, que está en función del electrodo de referencia.

El metal al potencial de corrosión, Ecorr tiene en su superficie corrientes anódicas y catódicas. Sin embargo, estas corrientes son exactamente igual en magnitud. El metal que está en equilibrio con el ambiente, su Ecorr se define como el potencial al cual la tasa de oxidación es exactamente igual a la tasa de reducción. Potenciales negativos de Ecorr general corrientes catódicas, mientras que potenciales positivos de Ecorr, generan corrientes anódicas. De esta manera, se obtienen las dos curvas.

La Figura 1.20 muestra la curva de polarización en donde la densidad de corriente está expresada en las abscisas, como una función del potencial aplicado. El Potencial está colocado en las ordenadas.

Se aprecia el Potencial de Corrosión, Ecorr y el Potencial de Picadura, Epic.

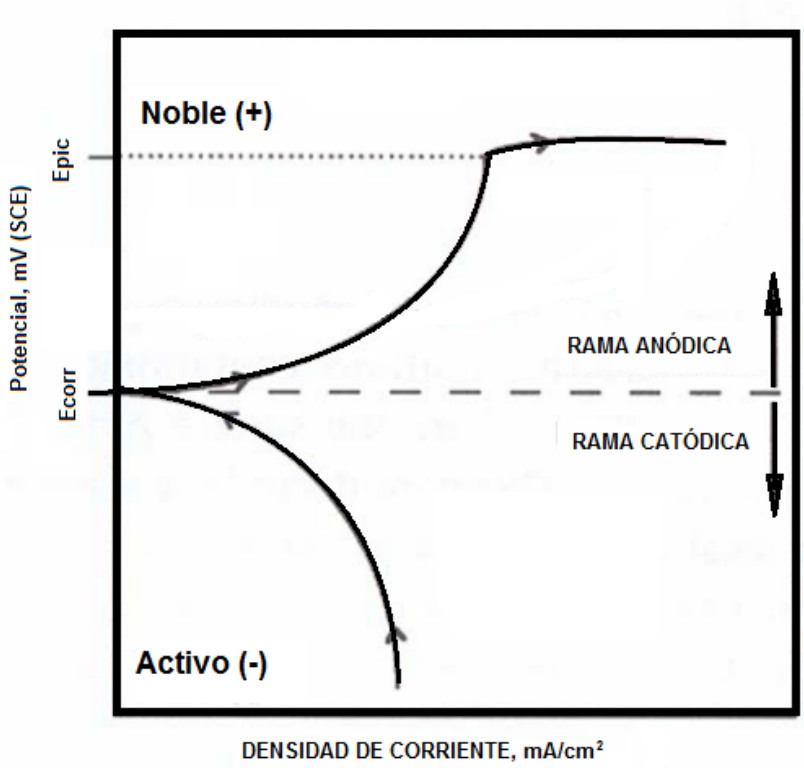


FIGURA 1.20.- CURVA DE POLARIZACIÓN TÍPICA [5]

Resistencia a la Polarización Lineal

Polarizar el ET con potenciales muy pequeños es conocida como la técnica de polarización lineal. Consiste en aplicar un sobrepotencial, respecto al potencial de equilibrio, lo suficientemente pequeño de tal forma que no altere el equilibrio asumido por el sistema, pero lo suficiente como para determinar el

comportamiento del metal en ese medio frente a las reacciones de oxidación y reducción. Lo anterior nos asegura que la relación entre voltaje de interfase y corriente de interfase sea lineal.

Si se utilizan valores de voltaje de polarización muy pequeños, la ecuación de Butler-Volmer, puede ser reducida a la siguiente, también conocida como la ecuación de Stern-Geary.

$$I_{corr} = B\frac{d_i}{d_\eta} = \frac{B}{R_p} \quad ; \quad B = \frac{b_a b_c}{2{,}303(b_a + b_c)} \qquad (5)$$

Donde,

di: variación pequeña de corriente

d η: variación pequeña de voltaje

B: relación de pendientes de Tafel

ba: Pendiente de Tafel Anódica

bc: Pendiente de Tafel Catódica

La pendiente de la recta en la gráfica V vs. i para un ΔE de 20mV es la Resistencia a la Polarización Rp. Figura 1.21.

Un rango de ±20 mV respecto al potencial de equilibrio del ET, asegura la linealidad de la relación,

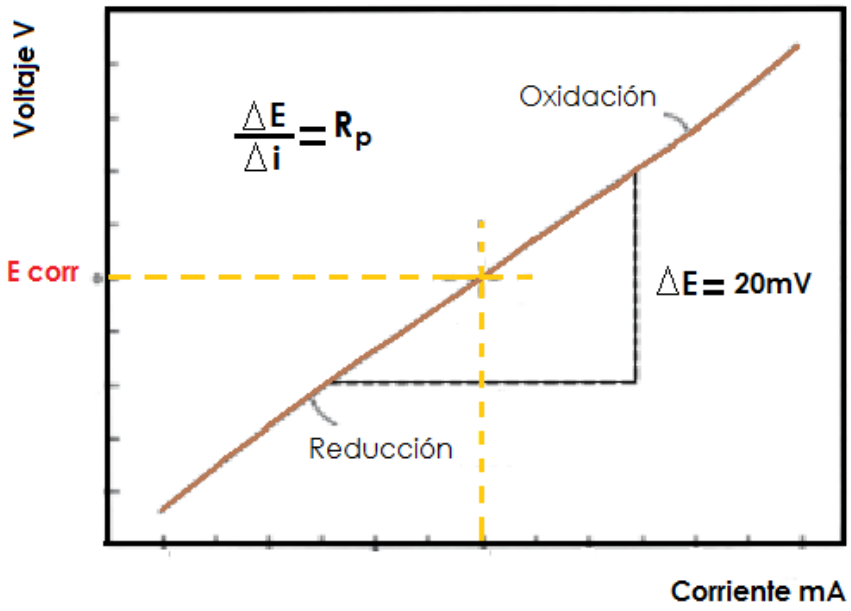


FIGURA 1.21.- TÉCNICA DE LA RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LIINEAL [4]

Técnica de las Pendientes de Tafel.

La relación entre Voltaje y Corriente para amplios rangos de polarización (± 200 mV) respecto al potencial de equilibrio, corresponde a la ecuación de Butler-Volmer. Esta ecuación fue convertida por Tafel a una forma semilogarítmica:

$$\eta = a + b \ln i \qquad (6)$$

Con a y b constantes, donde b es la pendiente de Tafel anódica ó catódica.

$$b_a = \frac{2{,}303RT}{F} \quad (7) \quad y \quad b_c = -\frac{2{,}303RT}{F} \quad (8)$$

Esta ecuación permite por extrapolación geométrica, determinar la corriente de corrosión.

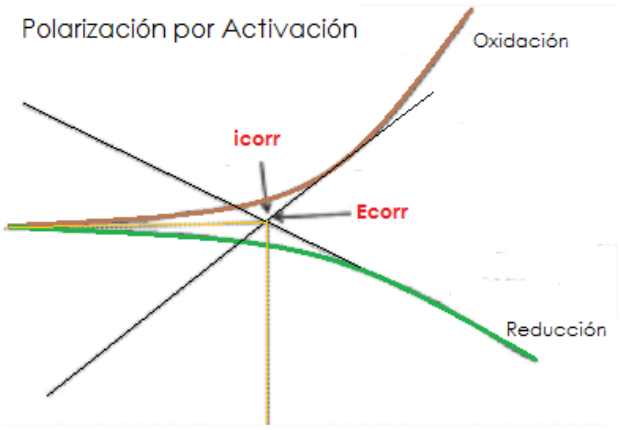


FIGURA 1.22.- CORRIENTE DE CORROSIÓN icorr [4]

Para formular un correcto método experimental de eta técnica, se recomienda consultar las Normas ASTM G3-89, G5-94, G59-97 y G102-89.

Las pendientes se trazan mediante la graficación de una línea tangente a las curvas de polarización anódica y catódica, Figura 1.22. El punto donde se interceptan las rectas tangentes, es el punto de corte en el eje de corriente, correspondiendo este punto a la corriente de corrosión icorr.

La Tabla XIV, menciona los valores de Potenciales de Corrosión, Ecorr, para diferentes metales y aleaciones metálicas:

Tabla XIV [(6)]

Valores de Potencial Natural vs. SCE

Metal / Aleación	Potencial (V)
Magnesio	-1,73
Zinc	-1,10
Aleaciones de Aluminio	
Alclad 6061, 7075	-0,99
5046, 5083	-0,87
5052, 5086	-0,85
3004, 1060, 5050	-0,84
1100, 3003, 6063, 6061	-0,83
2014 - T4	-0,69
Cadmio	-0,82
Acero Dulce	-0,58
Cobre	-0,20
Acero Inoxidable (3xx)	-0,09

El aluminio en condiciones normales se encuentra pasivado, pero por pequeños aumentos en el potencial, inicia una forma de corrosión muy seria, tal como lo es el picado.

En soluciones que contengan cloruro de sodio, el aluminio presenta una curva de polarización mostrada en la Fig. 23.

Se aprecia que, por debajo del potencial Ep, el aluminio permanece pasivo, pero sobre este potencial, el aluminio se pica muy rápidamente. El potencial de picado se encuentra bajo el potencial de equilibrio de reducción de oxígeno, de manera que este ataque debe presentarse en soluciones oxigenadas o aireadas, como es el caso del agua de mar.

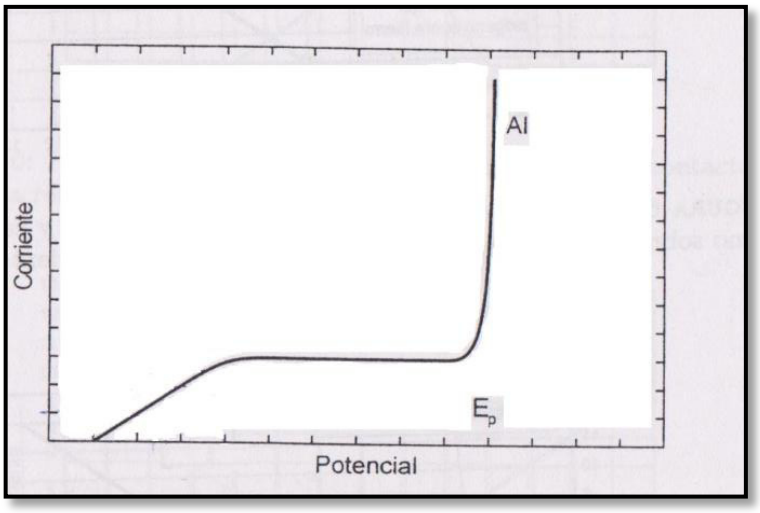


FIGURA 1.23.- CURVA DE POLARIZACIÓN TÍPICA DEL ALUMINIO [7]

CAPÍTULO 2

1. ENSAYOS METALÚRGICOS DE CORROSIÓN

Descripción del experimento: El experimento consiste en determinar la velocidad de Corrosión del Aluminio UNS A5083 mediante la determinación de su Curva de Polarización utilizando los métodos, equipos y materiales descritos en el presente Capítulo.

2.1. Definición del Modelo Experimental: Materiales, Equipos y Metodologías

El material en estudio es la aleación de Aluminio de uso naval Al5083. Se ha empleado material del mismo lote para efectuar estos ensayos, es

decir, una plancha de 12 mm de espesor y con dimensiones 6000 x 1500 mm.

La composición de la aleación 5083 está detallada en el Anexo. La plancha fue soldada con un procedimiento MIG cuyos parámetros fueron previamente fijados y se muestran en la Tabla IX.

2.1.1.- Probetas o Electrodos de Trabajo

Las probetas fueron cortadas para luego ser mecanizadas en el torno hasta obtener probetas cilíndricas con un área de 1cm2, posteriormente fueron pulidas y limpiadas.

Este procedimiento fue realizado para tres zonas específicas, el metal, la junta soldada, y la zona afectada por el calor. El proceso aplicado se detalla en las Figuras 2.2 y 2.3.

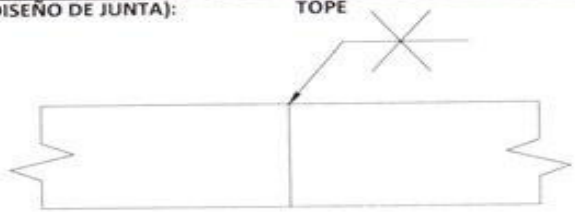
FIGURA 2.1.- FOTOGRAFÍA DE CORTE DEL MOLDE

astinave

LOCALIZACION: Guayaquil-Ecuador (Vacas Galindo s/n y Vivero)
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA DE ASTINAVE APLICADO AL: PROYECTO CAE
REFERENCIA: AWS D1.2/D1.2M:2003; AWS D 3.7:2004
No. WPS: CAE - 10
FABRICANTE: ASTILLEROS NAVALES ECUATORIANOS
PROCESO DE SOLDADURA: GAS METAL ARC WELDING (GMAW)/ METAL INERT GAS (MIG)

TIPO DE JUNTA: TOPE

JOINT DESIGN (DISEÑO DE JUNTA): TOPE



PASADA	PROCESO	MEDIDA DEL MATERIAL DE APORTE	CORRIENTE (A)
1	GMAW	1,2 mm	270 - 330
2	GMAW	1,2 mm	300
3	GMAW	1,2 mm	300
4	GMAW	1,2 mm	300
5	GMAW	1,2 mm	300

1.) WELDING POSITION FOR (AWS ER 5356): 1G
2.) WELDING POSITION FOR (AWS ER 5356): 1G

AWS ER5356 ALCOTEC
CLASIFICACION DEL METAL DE APORTE Y MARCA
ESPECIFICACIÓN DEL METAL DE APORTE: AWS A5.10

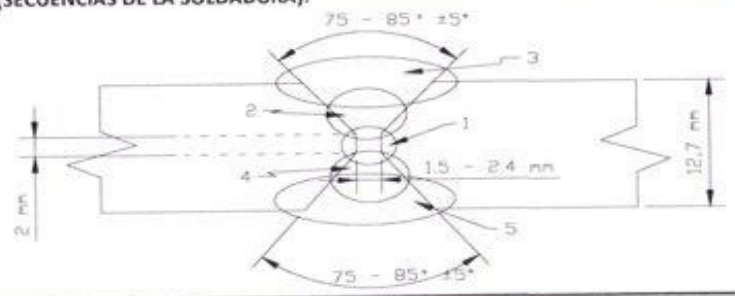
GAS O FUNDENTE: ARGON
PROTECCION: GAS
RESPALDO: N/A
FLUJO DE GAS 28 Lit/min
PROTECCION: N/A
RESPALDO: N/A
ELECTRODO DE TUNGSTENO TIPO Y TAMAÑO: N/A
PRECALENTAMIENTO: N/A
TEMPERATURA ENTRE PASES:

FIGURA 2.2.- Procedimiento de Soldadura Aplicado. WPS

ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA(WPS)

METODO DE LIMPIEZA: GRATA Y DISCO
ESPECIFICACION DEL MATERIAL BASE: AI 5083 H 116
ESPECIFICACION DEL MATERIAL DE APORTE: 5356
ESPESOR DEL MATERIAL: 12,7 mm y 12,7 mm
DIAMETRO EXTERIOR: N/A
POSICION DE SOLDADURA: 1G

WELDING SEQUENCES(SECUENCIAS DE LA SOLDADURA):



VOLTAJE (V)	TIPO DE CORRIENTE/ POLARIDAD	VELOCIDAD DE AVANCE DEL ALAMBRE (mm/min)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)	HEAT INPUT (KJ/mm)
26 - 30	CC +	408 - 612	N/A	0,9882
28	CC +	510	N/A	0,9882
28	CC +	510	N/A	0,9882
28	CC +	510	N/A	0,9882
28	CC +	510	N/A	0,9882

1.- LIMPIAR CON GRATA DE ALAMBRE DE ACERO INOXIDABLE Y DISCO DE DESBASTE SI ES NECESARIO.
2.- CUANDO SE SUELDE AL REVERSO LIMPIAR CON GRATA Y DISCO, ANTES DE APLICAR EL PASE DE LA SOLDADURA
3.- ANTES DE SOLDAR VERIFICAR QUE EL METAL BASE ESTE LIBRE DE SUCIEDAD, PARTÍCULAS DE METAL ACEITE, GRASA, PINTURA, HUMEDAD Y ÓXIDOS. EN CASO DE EXISTIR REALIZAR LA LIMPIEZA CON UN DESENGRASANTE QUE NO DESARROLLE GASES TÓXICOS DURANTE LA SOLDADURA, UNA SOLUCIÓN LIGERAMENTE ALCALINA, ALCOHOL O ACETONA, SEGÚN SEA EL CASO.

REALIZADO POR:

ING. FERNANDO MORA VALVERDE.
REG. PROF. 04-09-970
INSPECTOR DE SOLDADURA

ING. ROBERTO FRAGA

FIGURA 2.3.- Procedimiento de Soldadura Aplicado. WPS

FIGURA 2.4.- FOTOGRAFÍA DEL PRIMER PASE

FIGURA 2.5.- FOTOGRAFÍA DEL ÚLTIMO PASE

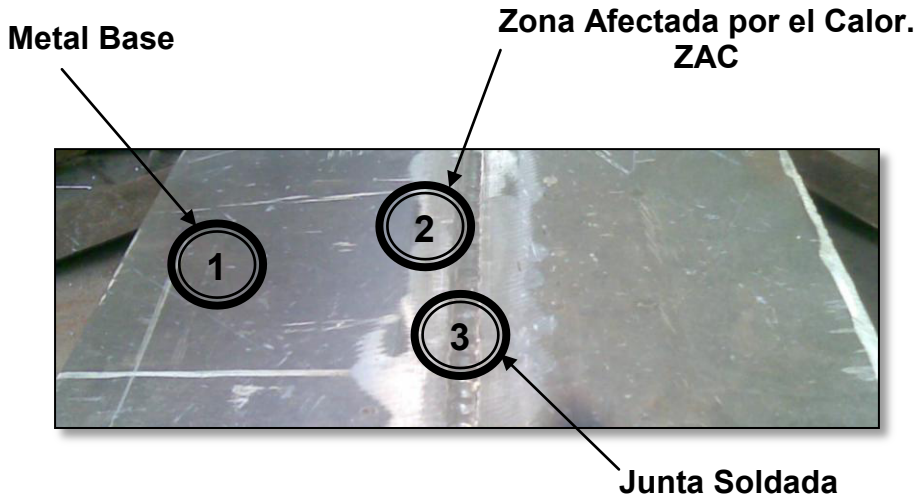


FIGURA 2.6.- ZONIFICACIÓN DE PROBETAS

FIGURA 2.7.- PROBETAS CORTADAS Y TORNEADAS

Electrodo de Referencia

El electrodo de referencial utilizado es el Plata Cloruro de Plata. Tiene un valor del potencial de aproximadamente de + 0.22 V respecto al Electrodo Normal de Hidrógeno (ENH) a 25°C. El potencial del electrodo depende muy especialmente de la salinidad de la solución en la cual el electrodo está sumergido. Figura 2.8.

FIGURA 2.8.- ELECTRODO DE REFERENCIA Ag/AgCl Y CONTRAELECTRODOS INOX 304.

Contraelectrodos

Como contra-electrodos para cada media celda electroquímica, se usaron dos barras de acero inoxidable 304. La temperatura de trabajo de los ensayos fue de 25°C.

2.1.2.- Equipos

El ensayo experimental cuenta con los equipos siguientes.

Potencio-galvanostato

FIGURA 2.9.- POTENCIO-GALVANOSTATO DE LEMAT

Para realizar el control de la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia, se utiliza un equipo electrónico denominado Potenciogalvanostato. Fig. 2.9.

En este experimento se utilizó un Potenciostato Modelo 362, de la Fábrica Princeton “Applied Research”, ubicado en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Para el control de la celda este equipo cuenta con un Kit cable de celda que tiene las siguientes puntas de pruebas:

- Electrodo de trabajo o de prueba;
- Electrodo de referencia;
- Contraelectrodo;
- Referencia o tierra (GND).

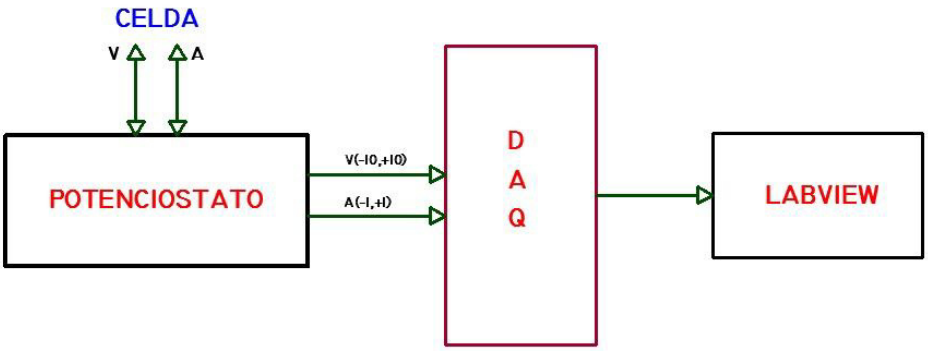


FIGURA 2.10.- DIAGRAMA DE BLOQUES

Cabe mencionar que las salidas POTENCIAL MONITOR y CURRENT MONITOR están en forma de VOLTAJE. Con un rango de -10VDC a +10VDC y -1VDC a +1VDC respectivamente.

Módulo de Adquisición de Datos

Este módulo es utilizado con el propósito de digitalizar las señales análogas de salida del Potenciogalvanostato (voltaje, corriente) para su posterior procesamiento en un computador con el software apropiado según la aplicación.

La adquisición de datos basada en PC utiliza una combinación de hardware modular, software de aplicación y una PC para realizar medidas.

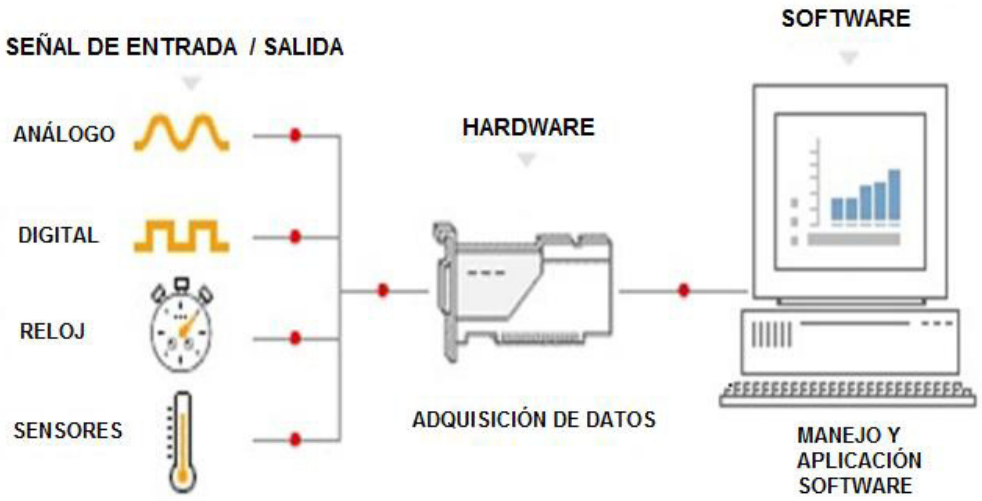


FIGURA 2.11.- ESQUEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En el experimento se utilizó una unidad externa de Nacional Instruments NI USB-6211.

Entre sus características tenemos:

- 16 entradas analógicas (16 bits, 250 kS/s)
- 2 salidas analógicas (16 bits a 250 kS/s), 4 entradas digitales, 4 salidas digitales, contadores de 32 bits

FIGURA 2.12.- MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

- Energizado por bus USB para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada

- NI “signal streaming” para transferencia de datos bidireccional a alta velocidad en USB;
- El software de NI-DAQmx y software de programación gráfica LabVIEW versión 8.5 para registro de datos.

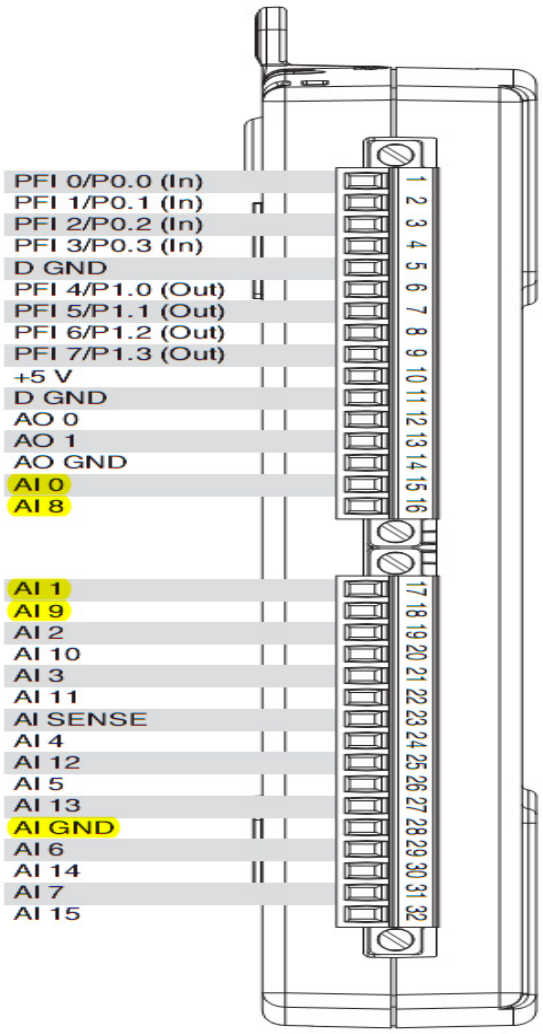


FIGURA 2.13.- SALIDAS DEL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Las salidas de Potenciogalvanostato de voltaje y corriente se conectaron en las entradas AI 0 - AI 8 y AI 1 - AI 9 respectivamente. Estas están configuradas como entradas de voltaje diferencial para minimizar las interferencias de modo común. La referencia 0V del Potenciogalvanostato también fue conectada al pin AI GND, Figura 2.14.

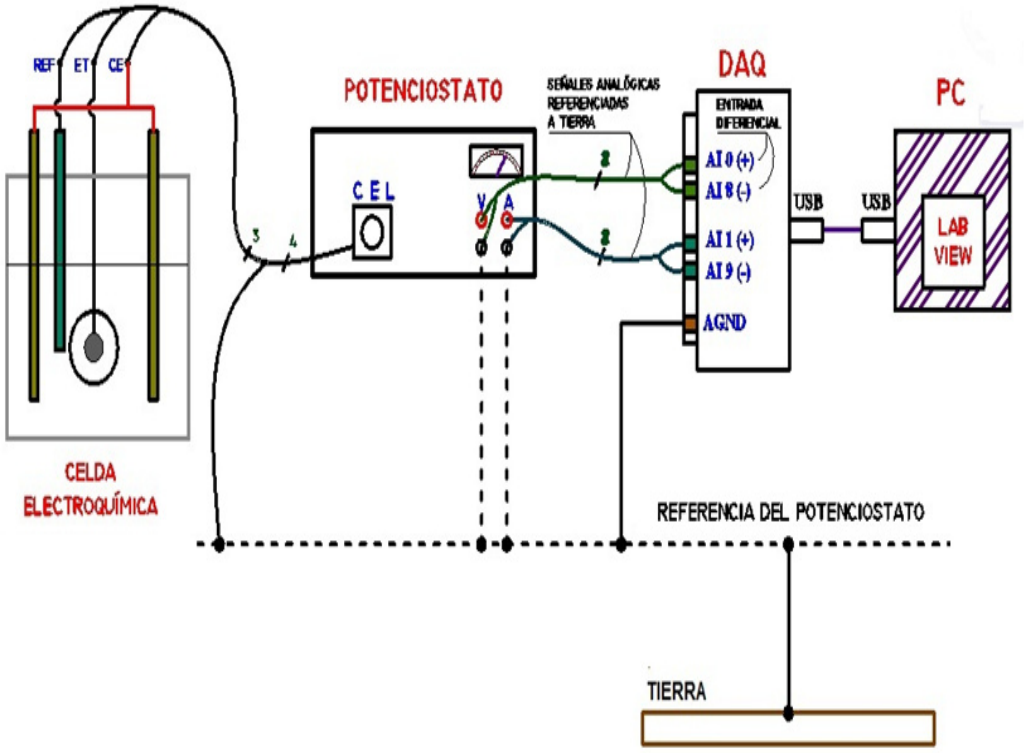


FIGURA 2.14.- DIAGRAMA DE CONEXIÓN

2.1.3.- Metodologías

Este subcapítulo describe los escenarios en los que se desarrolló el experimento y las técnicas utilizadas.

Electrolito

Todos los ensayos se realizaron con inmersión de las probetas en agua salada artificial (cloruro de sodio al 3,5% + agua desionizada). La preparación del agua salada artificial se aprecia en la Fig. 2.15.

FIGURA 2.15.- PREPARACIÓN DE ELECTROLITO

Celda Electroquímica

La celda electroquímica consta de un recipiente de vidrio, Figura. 2.16, con capacidad de 1dm3 cuya tapa de teflón ha sido mecanizada para sujetar los contraelectrodos de acero inoxidable, la probeta de trabajo y el electrodo de referencia.

FIGURA 2.16.- CELDA ELECTROQUÍMICA

Técnicas Utilizadas

Las técnicas electroquímicas empleadas están basadas en la Norma ASTM G5–94 “Método estándar de referencia para mediciones potenciostáticas y potenciodinámicas de polarización directa”, en donde se establece que las muestras deben reposar hasta alcanzar estabilidad al menos durante 50 minutos, y la Norma ASTM G 102–89 “Práctica estándar para el cálculo de tasas de corrosión e información relacionada con mediciones electroquímicas”.

Procedimiento

Establecimos en la celda un potencial inicial de -1.8V durante 50 minutos, luego de los cuales iniciamos un barrido de voltaje en un rango de -1. V a 0.1 V con un paso de 1mV/seg, lo que nos da un tiempo total de barrido de 1900 segundos.

Antes de realizar cualquier experimento en el que se vaya a adquirir datos de señales análogas por medios digitales, se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. Buen sistema de referencia (tierra-GND).
2. Elección de la forma de conexión de las señales al módulo de adquisición de datos.
3. Asegurarse que los equipos estén correctamente calibrados.

Con respecto al punto 1, es necesario mencionar que el Potenciostato tiene todas sus salidas referenciadas por el polo negativo (terminal negro), al mismo nivel que la referencia de la celda (GND). Por lo tanto al tener referenciadas las salidas del Potenciogalvanostato a tierra, se convierten, valga la redundancia, en fuentes de señal referenciadas a tierra. Reconocer esto es importante para satisfacer el punto 2.

Es conocido que, cuando se quiere minimizar al máximo la influencia del ruido eléctrico por interferencias externas, el ruido de tierra, e incrementar al máximo el rechazo al ruido de modo común, lo mejor es una entrada diferencial a nuestro amplificador de instrumentación del módulo de adquisición de datos.

Estas son las pautas del fabricante del modulo de adquisición de datos para el uso de conexiones con entradas diferenciales:

a) La señal de entrada es de nivel bajo (menor a 1 V).
b) Los cables de conexión de la señal al dispositivo son mayores a 3 metros.
c) La señal de entrada requiere un punto de referencia a tierra separado o señal de retorno.
d) Los cables de conexión viajan a través de ambientes con mucho ruido eléctrico.
e) Están disponibles dos canales de entrada análoga, AI+ y AI-.

Claramente cumplimos con a, c y e, por lo tanto será usada la conexión de entrada diferencial.

A continuación se muestra el esquema de conexión sugerido por el fabricante para una señal referenciada a tierra conectada en entrada diferencial. Fig. 2.17.

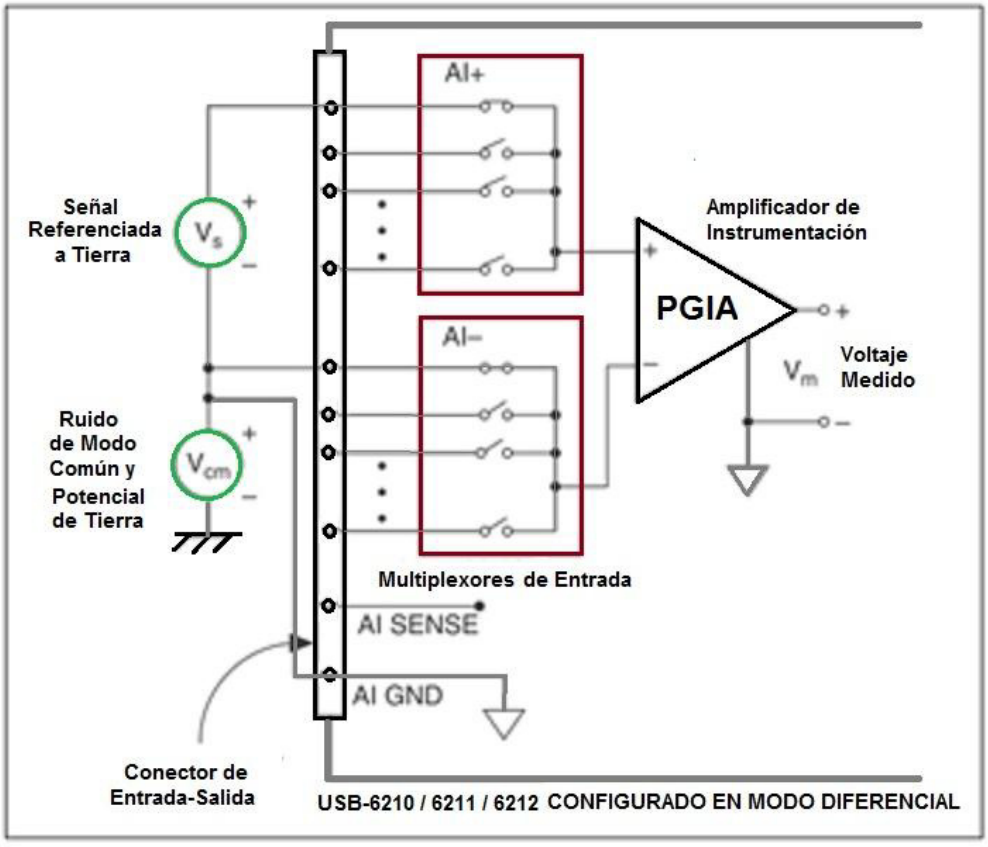


FIGURA 2.17.- CONEXIÓN DE SEÑAL REFERENCIADA A TIERRA CONECTADA EN ENTRADA DIFERENCIAL.

Para el punto 3, necesitamos la ayuda de un multímetro digital y una fuente fija de voltaje para calibrar el modulo de adquisición de datos.

Ingresamos a la aplicación de calibración que viene con el software de LabVIEW, seguimos los pasos sugeridos, teniendo en cuenta el rango de la señal que vamos a medir.

Como fuente de voltaje fija podemos usar el Potenciostato, variando manualmente el voltaje final Ef, corroborándolo en el voltímetro analógico del equipo y en el indicador digital de nuestro multímetro.

Una vez que hemos introducido una serie de valores a lo largo de la escala de nuestra variable y hemos conseguido valores de error tolerables, damos por concluida la calibración del módulo de adquisición de datos.

La manera más recomendada por los fabricantes de Potenciogalvanostato para asegurar que este calibrado y en buen funcionamiento es utilizar una resistencia conocida y basarse en la ley de Ohm (que es básicamente la que rige el funcionamiento del Potenciostato). Figuras 2.19 y 2.20.

En nuestro caso utilizamos una resistencia de 1MOhm con 20% de tolerancia, conectada de la siguiente manera: el contraelectrodo y el electrodo de referencia en un terminal y el electrodo de trabajo en el otro, luego iniciamos un barrido de -5VDC a +5VDC y con ayuda del módulo de adquisición de datos y el programa hecho en LabVIEW monitoreamos la salida del Potenciostato. Figura 2.18.

Al final realizamos una gráfica Voltaje versus corriente, en cuya pendiente encontramos un valor constante dentro de la tolerancia de nuestra resistencia.

FIGURA 2.18.- CALIBRACIÓN DE LA LECTURA DE DATOS POR MEDIO DE UNA RESISTENCIA CONOCIDA

.

FIGURA 2.19.- MONITOREO DE LA RESISTENCIA CON MULTÍMETRO DIGITAL.

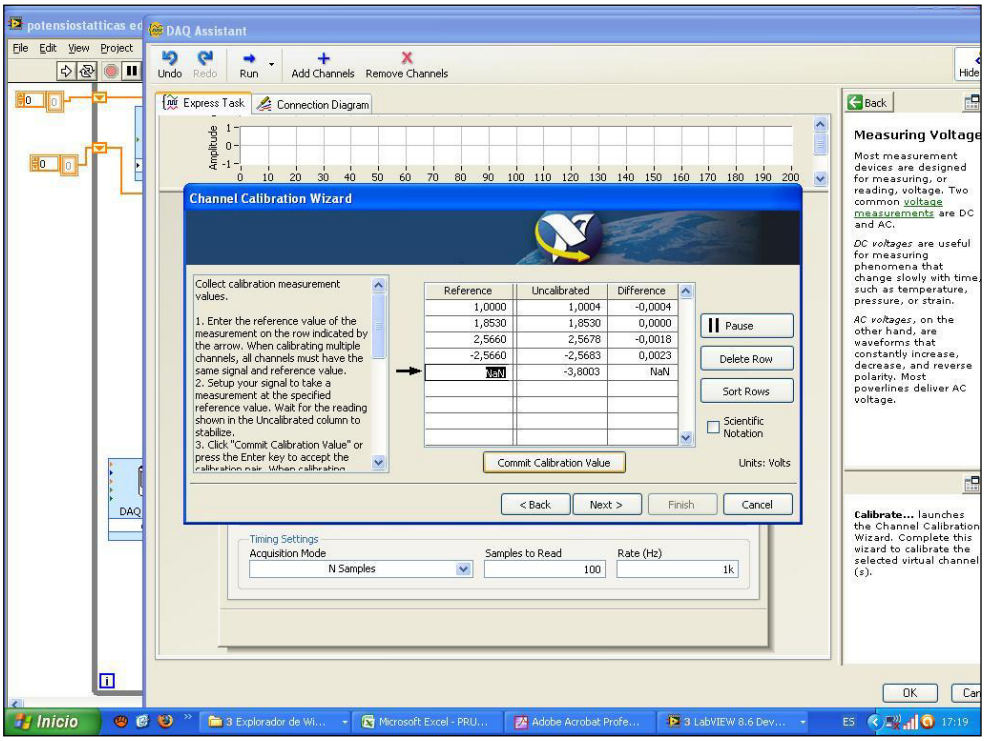


FIGURA 2.20.- CALIBRACIÓN DEL ERROR DE LA SEÑAL.

2.2. Ensayo Cinético de Corrosión del Sistema

El ensayo experimental cinético de corrosión acelerada para obtener las curvas de Polarización anódicas, utilizando el método potenciodinámico, se ilustra en las Figuras 2.21, 2.22 y 2.23.

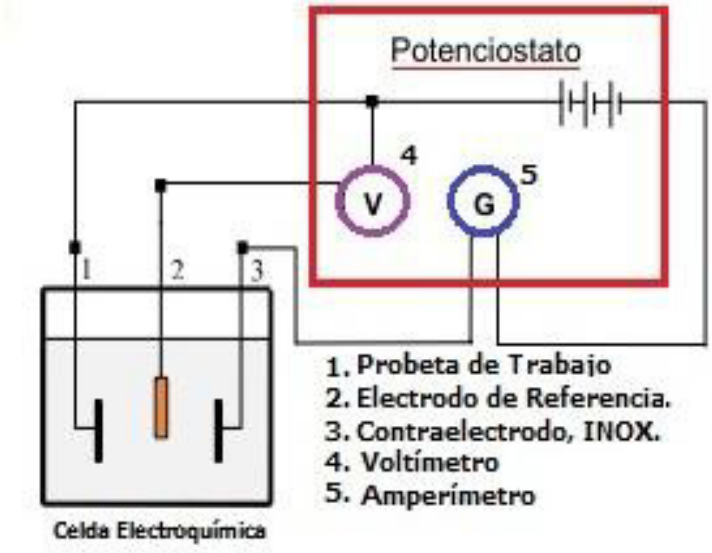


FIGURA 2.21.- ILUSTRACIÓN CELDA ELECTROQUÍMICA.

Las curvas de polarización obtenidas, bajo el sistema esquematizado en la Fig. 19, se desarrolló imponiendo a las semiceldas un rango de potencial eléctrico de -1,6 V a +0,1 V de tal forma que se genere un paso de corriente entre los contraelectrodos y el electrodo de trabajo.

FIGURA 2.22.- INSTALACIÓN DE EQUIPOS.

FIGURA 2.23.- POTENCIOGALVANOSTATO Y COMPUTADOR.

En el momento en que el metal cede electrones, un átomo metálico migra al electrolito como ión metálico, dejando un espacio físico vacio en la superficie del metal, lo cual no es más que un deterioro del mismo, reorganizando eléctricamente la interfase, haciendo que su potencial se haga más negativo.

2.2.1.- Gráficas Potenciodinámicas Obtenidas

Los resultados obtenidos se muestran en las Fig. 2.25 a 2.29.

Los valores de la corriente de corrosión se calcularán en el Capítulo 3 con dos métodos, mediante la pendiente de Tafel y mediante la Resistencia a la Polarización.

El cálculo de la Velocidad de Corrosión por el método de las pendientes de Tafel, se basa en la extrapolación de la Zona Lineal en un diagrama experimental Potencial vs. Logaritmo de Corriente.

Este método está basado en las siguientes Normas ASTM:

- **ASTM G3-89:** “Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Test”
- **ASTM G5-94**: “Standard Reference Test Method for making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements”

- **ASTM G59-97**: “Standard test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements”
- **ASTM G102-89**: “Standard Practice for Calculation of Corrosion rates and Related Information from Electrochemical Measurements”

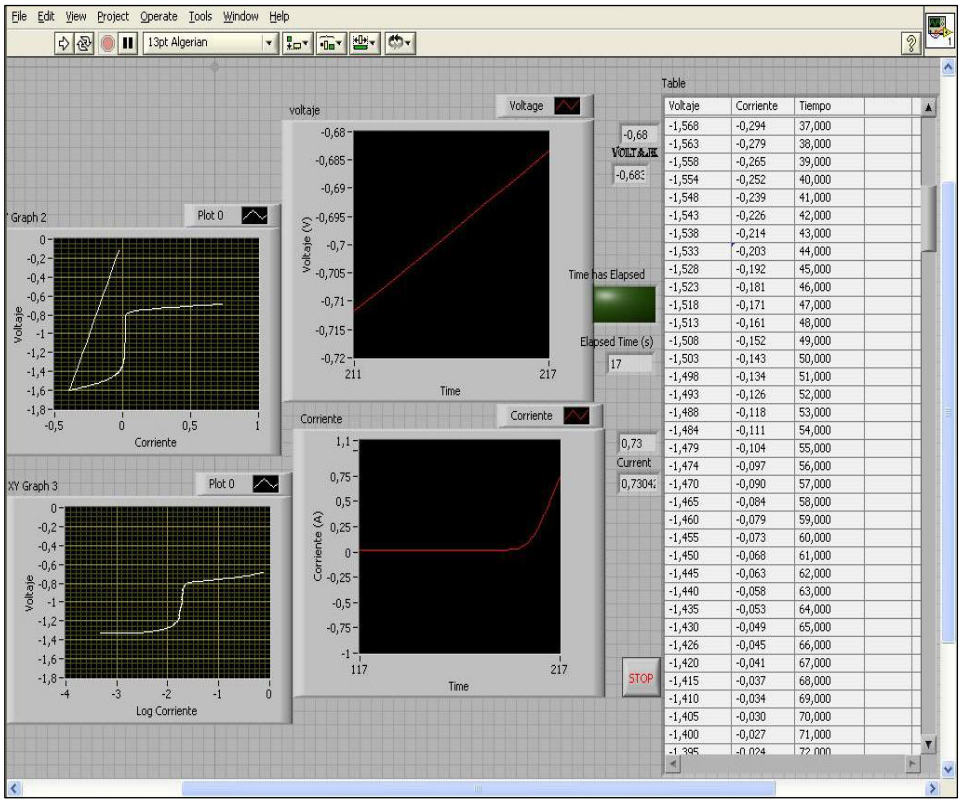
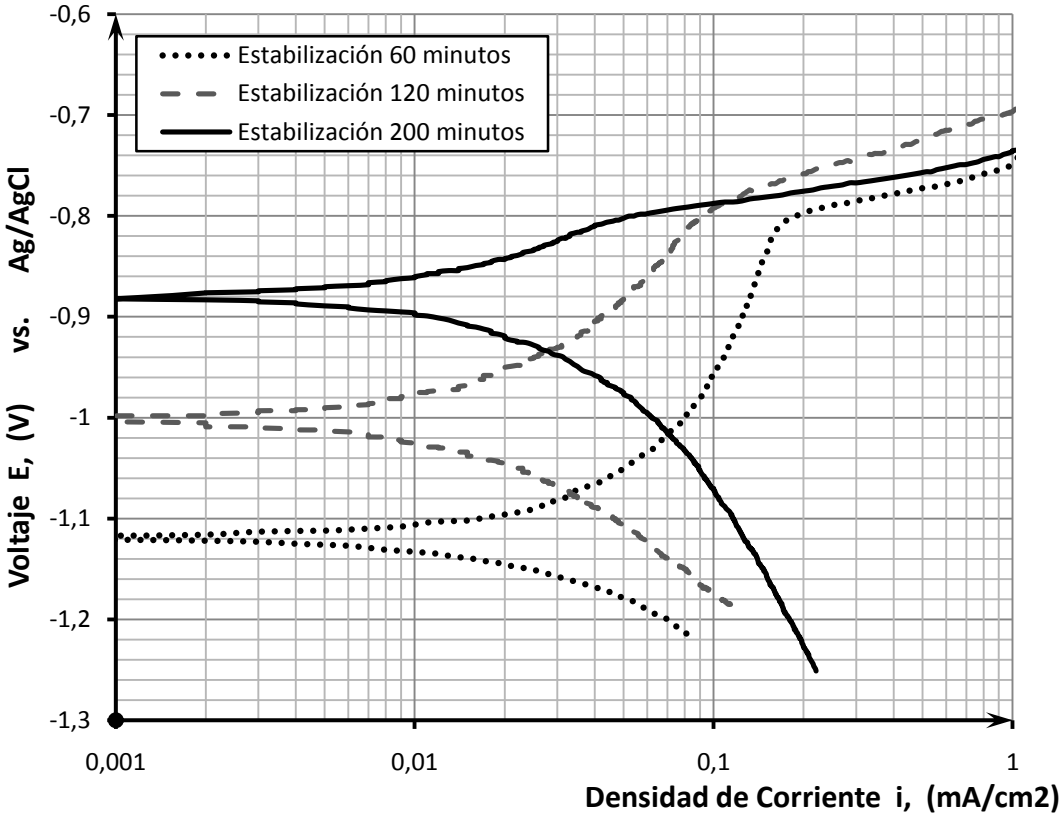


FIGURA 2.24.- GRAFICACIÓN DE CURVAS EN LABVIEW.

Las gráficas de las Curvas de Polarización se muestran a continuación de acuerdo al orden de ensayo ejecutado:

FIGURA 2.25
Curva de Polarización Potenciodinámica Probetas Metal Puro



DATOS DEL ENSAYO:

Rango Barrido: (-1.3 V, +0.2V)

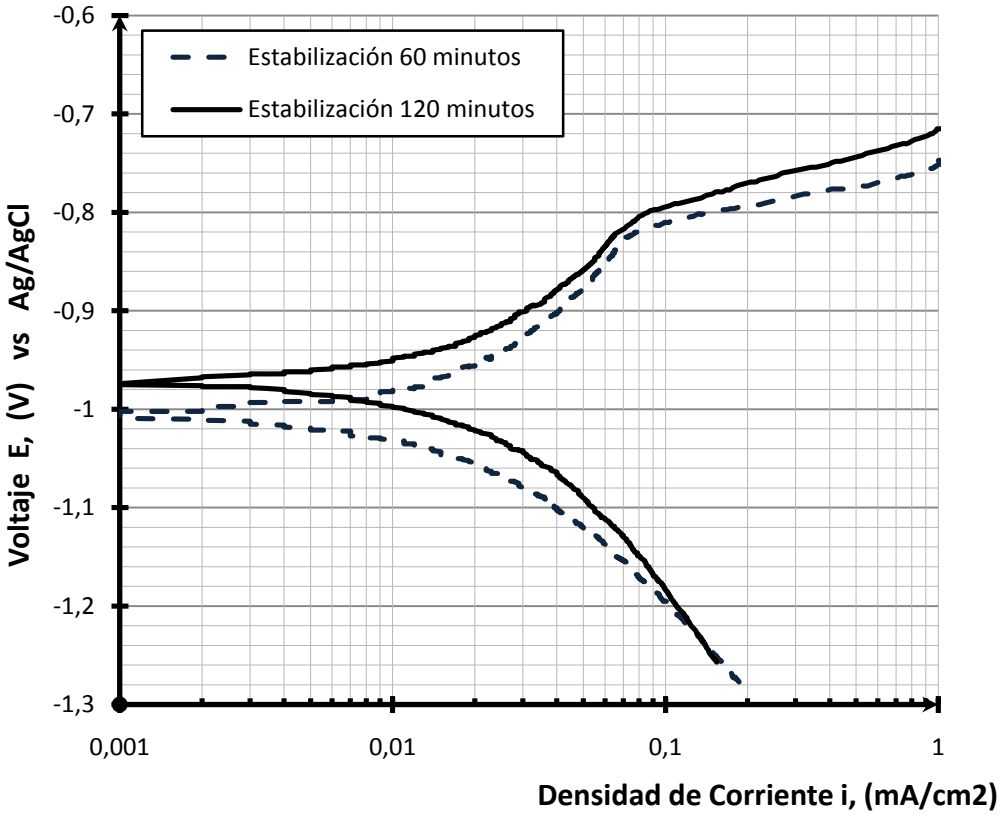
Tasa de Escaneo: 1mV/seg

Corriente estable: -0.22mA

Temperatura: 30°C - Tiempo de Barrido: 1500 segundos

Fecha: 23 de Diciembre de 2010 - Hora: 11:17 am

FIGURA 2.26
Curva de Polarización Potenciodinámica Probeta ZAC



DATOS DEL ENSAYO:

Rango Barrido: (-1.3 V, +0.2V)

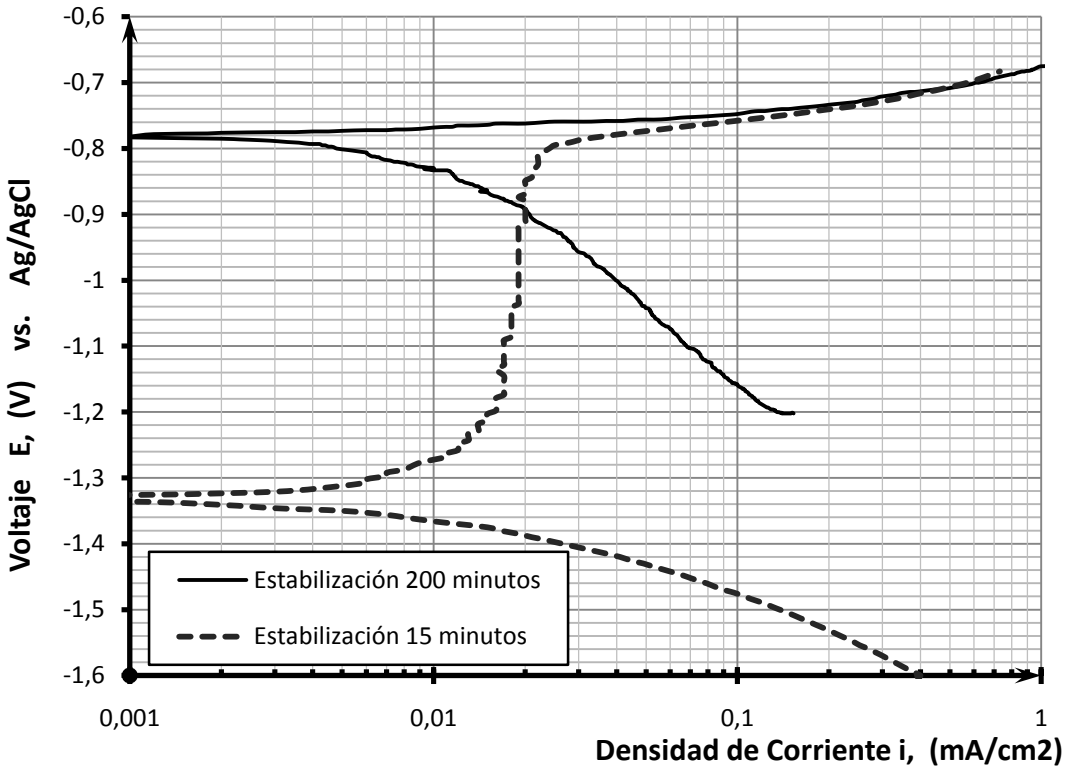
Tasa de Escaneo: 1mV/seg

Corriente estable: -0.25mA

Temperatura: 30°C - Tiempo de Barrido: 1500 segundos

Fecha: 27 de Diciembre de 2010 - Hora: 11:00 am

FIGURA 2.27
Curva de Polarización Potenciodinámica Probeta ZAC



DATOS DEL ENSAYO:

Rango Barrido: (-1.6 V, +0.2V)

Tasa de Escaneo: 1 mV/seg

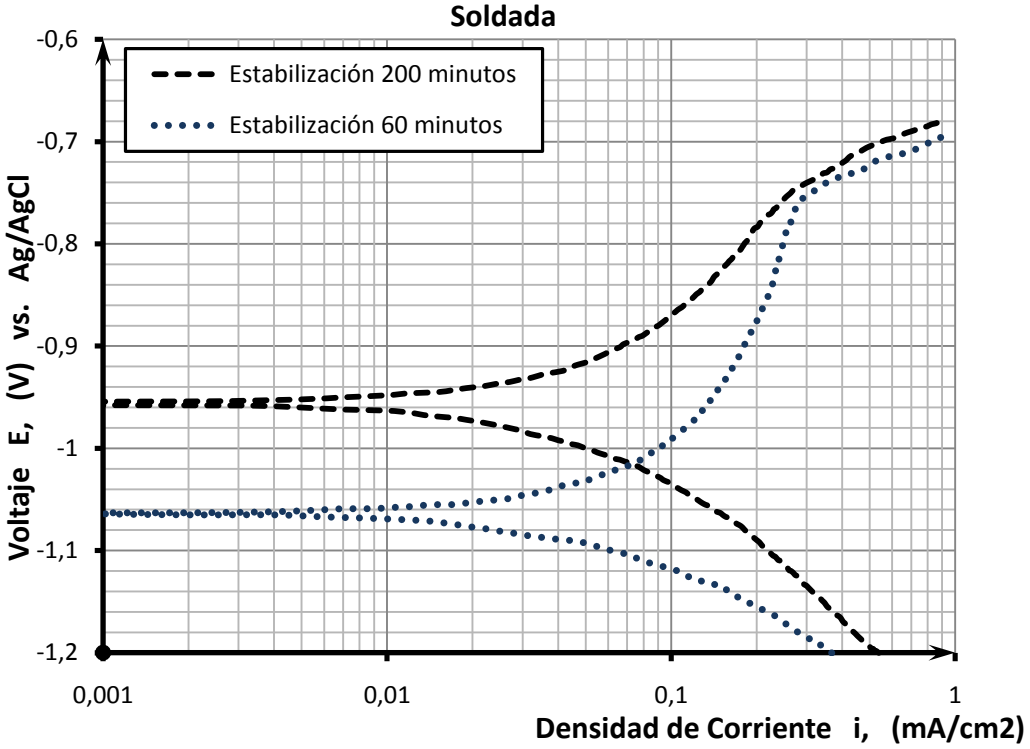
Corriente estable: -0.28 mA

Temperatura: 30°C

Tiempo de Barrido: 1500 segundos.

Fecha: 21 de Enero de 2011 Hora: 17:50

FIGURA 2.28
Curva de Polarización Potenciodinámica Probeta Junta Soldada



DATOS DEL ENSAYO:

Rango Barrido: (-1.2 V, +0.2V)

Tasa de Escaneo: 1 mV/seg

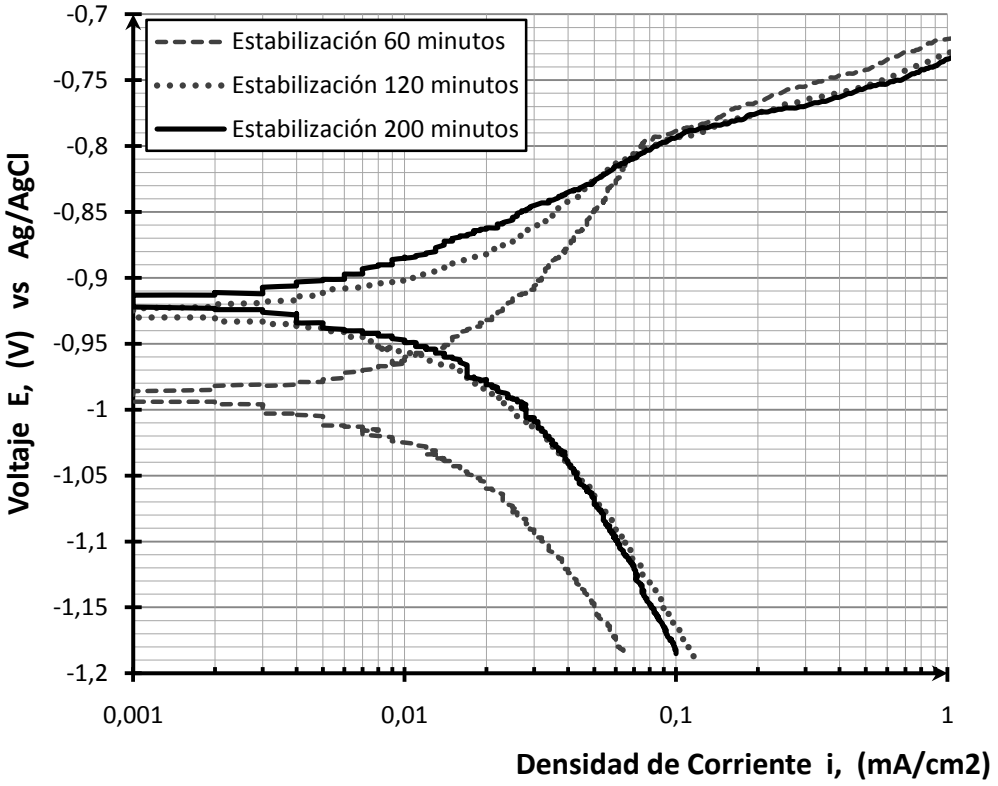
Corriente estable: -0.71 en 100μA

Temperatura: 32°C

Tiempo de Barrido: 1500 segundos.

Fecha: 22 de Enero de 2011 Hora: 10:03

FIGURA 2.29
Curva de Polarización Potenciodinámica Probeta Junta Soldada



DATOS DEL ENSAYO:

Rango Barrido: (-1.2 V, +0.1V)

Tasa de Escaneo: 1 mV/seg

Corriente estable: -0. 1 mA

Temperatura: 29°C

Tiempo de Barrido: 1500 segundos.

Fecha: 29 de Enero de 2011 Hora: 13:15

CAPÍTULO 3

1. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos en el proceso experimental detallado en el Capítulo II, se ha implementado las siguientes técnicas para realizar la correspondiente evaluación de los resultados.

- Técnica de Extrapolación de las Pendientes de Tafel.
- Método de la Resistencia a la Polarización Lineal.

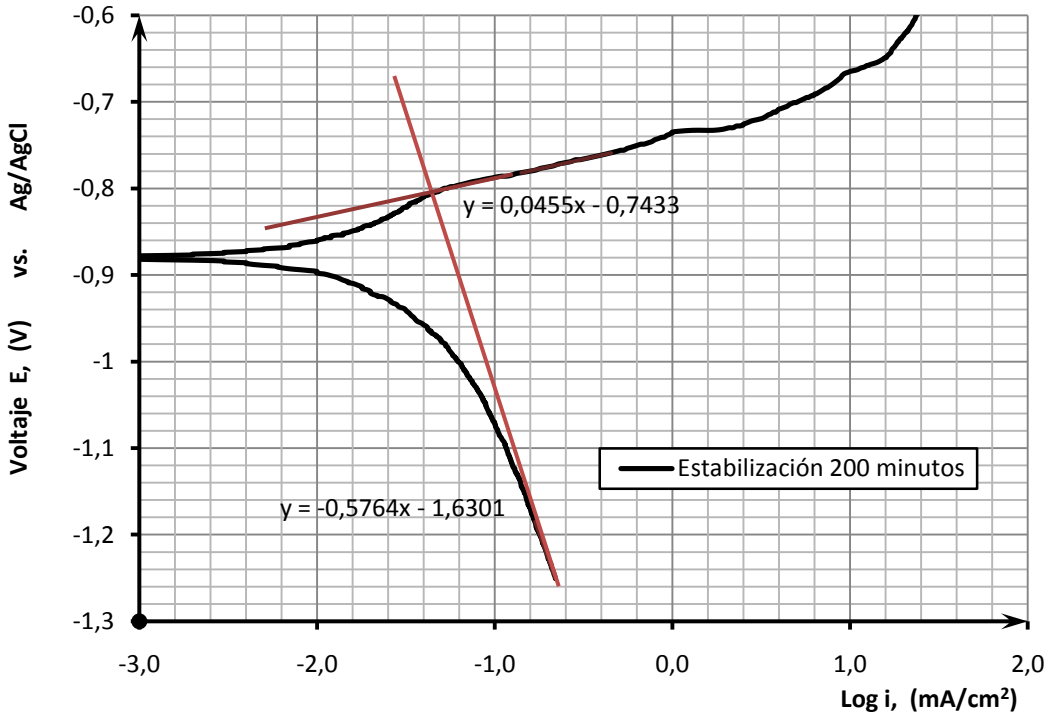
A continuación se presentan las gráficas obtenidas para cada caso.

3.1 Análisis y Comparación del Comportamiento Corrosivo del Sistema.

Pendientes de Tafel

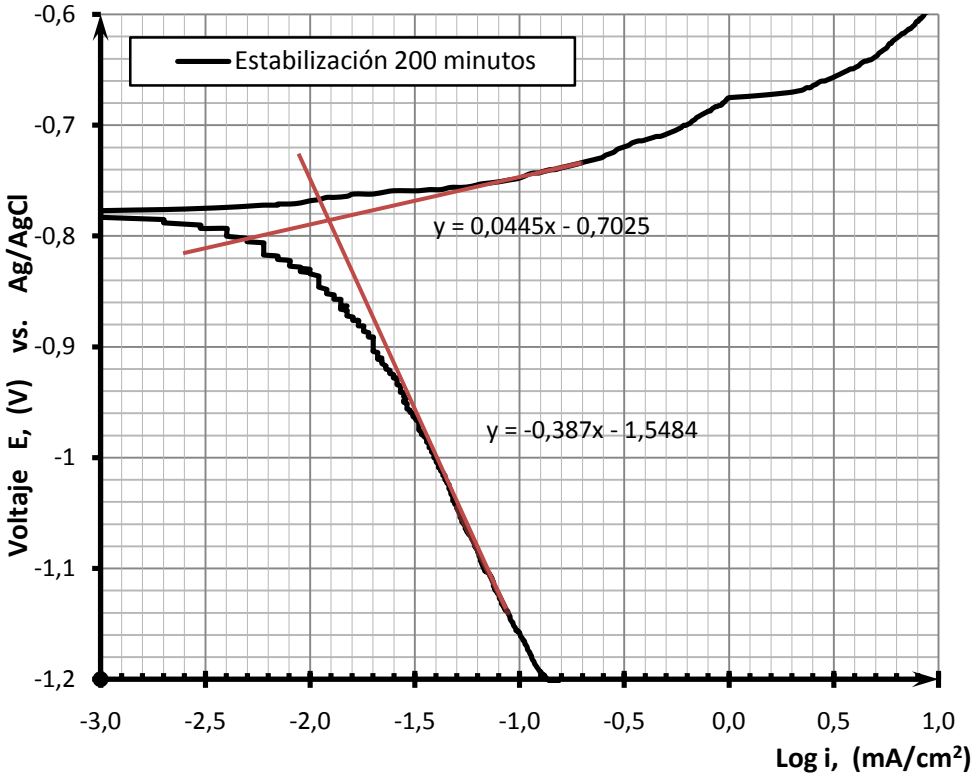
Las Pendientes de Tafel han sido obtenidas de las curvas Potencial vs. Logaritmo de la Corriente. A continuación se muestran las gráficas obtenidas para cada sistema evaluado.

FIGURA 3.1
Curva de Polarización Potenciodinámica Probeta Metal Base



log icorr	-1,4789
icorr (mA/cm²)	0,0332
Ecorr (V)	-0,811

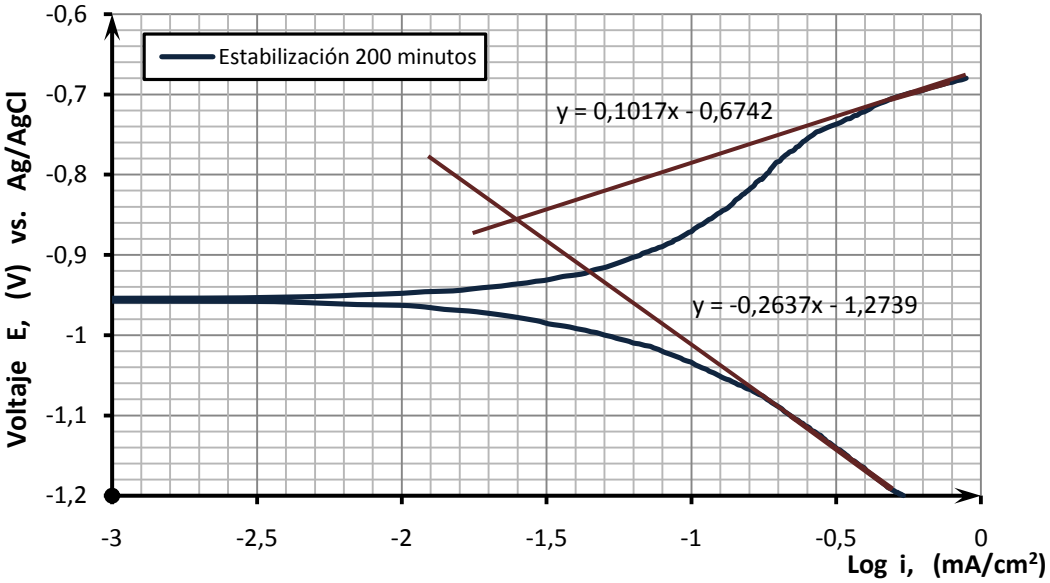
FIGURA 3.2
Curva de Polarización Potenciodinámica Probeta ZAC



Donde, por extrapolación se obtienen lo siguiente:

log icorr	-1,9607
icorr (mA/cm^2)	0,0109
Ecorr (V)	-0,790

FIGURA 3.3
Curva de Polarización Potenciodinámica Probeta Junta Soldada



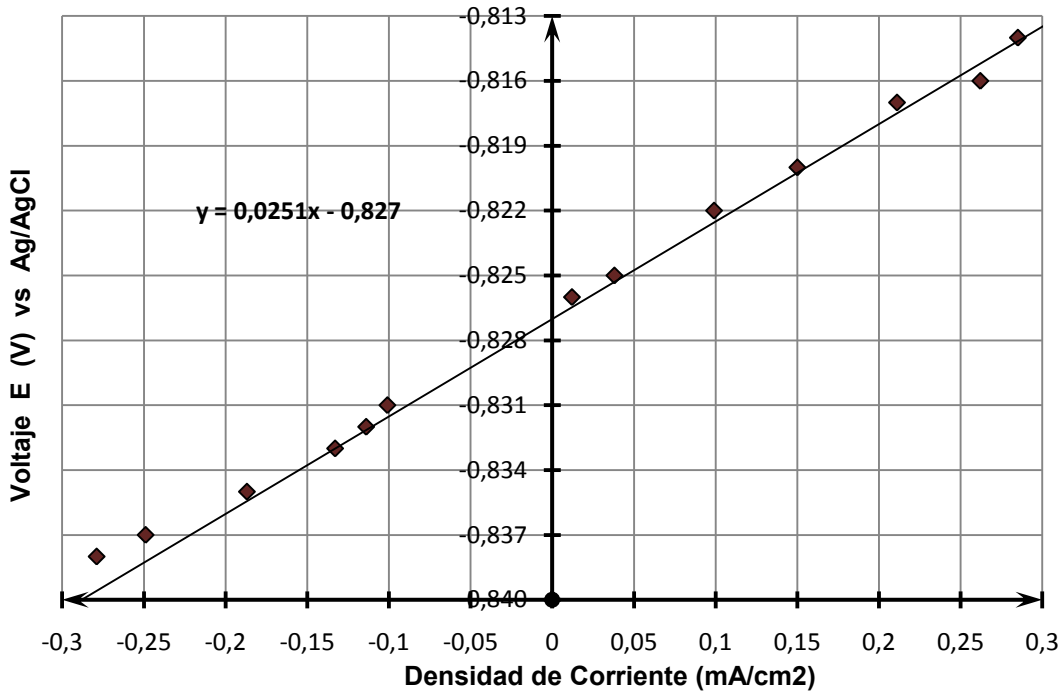
Donde,

log icorr	**-1,6415**
icorr (mA/cm^2)	**0,0228**
Ecorr (V)	**-0,841**

Técnica de la Resistencia a la Polarización Lineal

Se ha aplicado un Sobrepotencial de 20 mV sobre y bajo el Potencial de Corrosión Ecorr. El valor de **B** se ha calculado con la ecuación (5). Este rango asegura que la relación entre voltaje de interfase y corriente de interfase sea lineal. A continuación se muestran los gráficos obtenidos para cada zona.

Figura 3.4
Resistencia a la Polarización Lineal Probeta Metal Base



Donde, la Resistencia a la Polarización, Rp es:

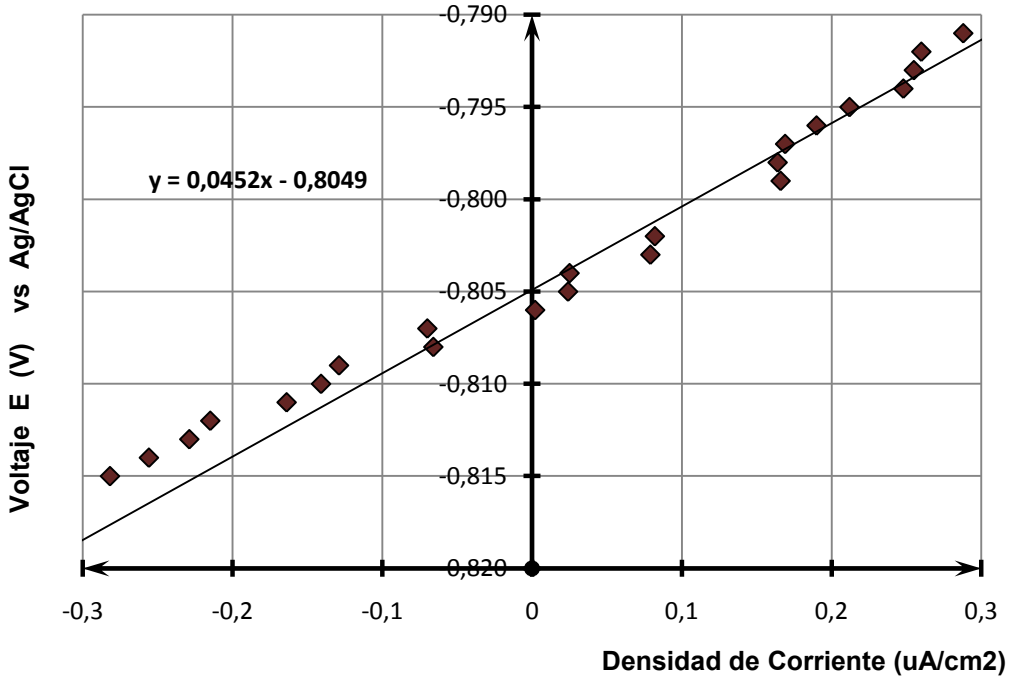
Rp= ΔE/Δi

Rp =	0,0251	V/mA/cm2
Rp=	25,1	Ohm/cm2
ba =	0,045	
bc =	-0,576	

$$B = \frac{ba * bc}{2{,}303 * Rp * (ba + bc)}$$

B=	0,8444	mV
icorr =	0,034	mA
E corr =	-0,827	V

Figura 3.5
Resistencia a la Polarización Lineal Probeta ZAC



Donde, la Resistencia a la Polarización, Rp es:

Rp= ΔE/Δi

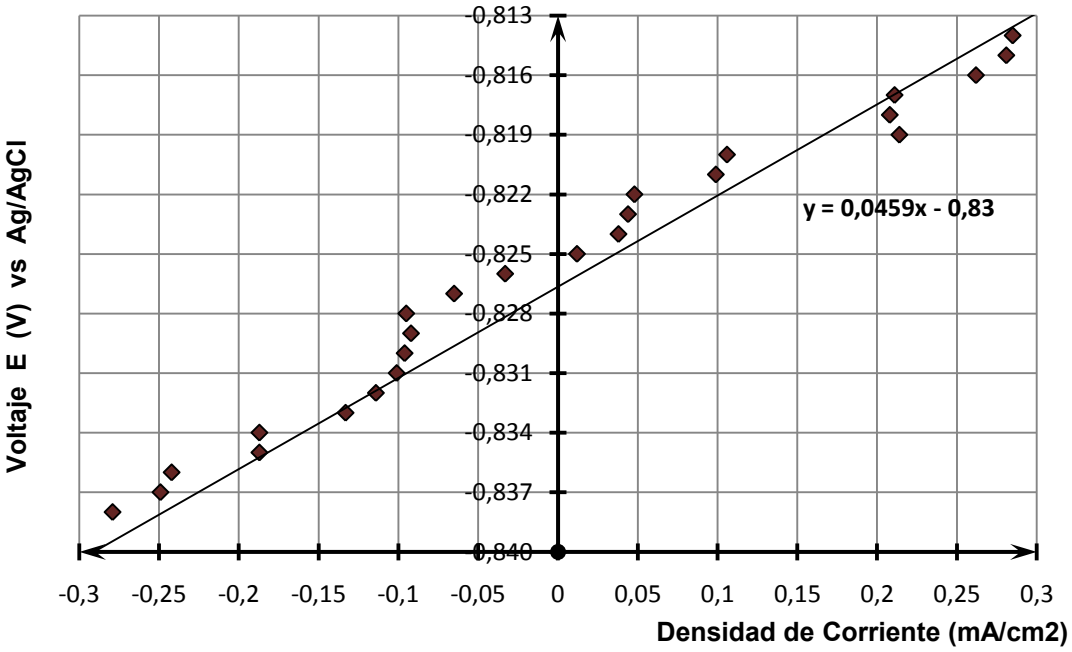
Rp =	0,0452	V/mA/cm2
Rp=	45,2	Ohm/cm2

ba =	0,044
bc =	-0,387

$$B = \frac{ba * bc}{2{,}303 * Rp * (ba + bc)}$$

B=	0,4769	mV
icorr =	0,011	mA
Ecorr =	-0,8049	V

Figura 3.6
Resistencia a la Polarización Probeta Junta Soldada



Donde, la Resistencia a la Polarización, Rp es:

Rp= ΔE/Δi

Rp =	0,0459	V/mA/cm2
Rp=	45,9	Ohm/cm2

ba =	0,102
bc =	-0,264

$$B = \frac{ba * bc}{2{,}303 * Rp * (ba + bc)}$$

B=	1,5725	mV
icorr =	0,024	mA
Ecorr =	-0,83	V

La Tabla XV resume los resultados obtenidos para cada zona:

Tabla XV

Resultados Obtenidos para icorr

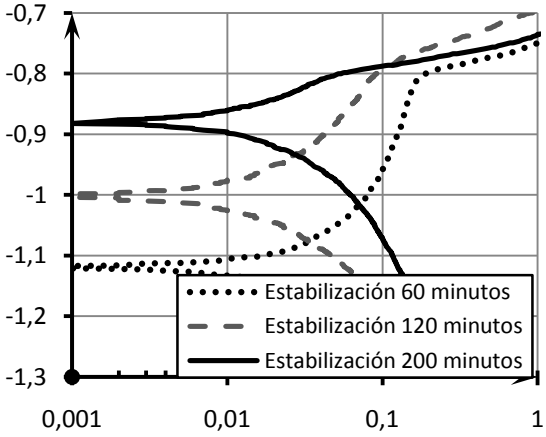
Estabilización 200 min.	ba (V/década)	bc (V/década)	icorr (mA/cm^2)		Ecorr (V)	
			TAFEL	RPL	TAFEL	RPL
Metal Base	0,045	-0,576	0,0332	0,034	-0,81	-0,82
ZAC	0,044	-0,387	0,0109	0,011	-0,79	-0,80
Junta	0,102	-0,264	0,0228	0,024	-0,84	-0,83

De acuerdo a los resultados obtenidos, tenemos que existe consistencia entre los métodos de cálculo empleados, pues los valores son muy cercanos.

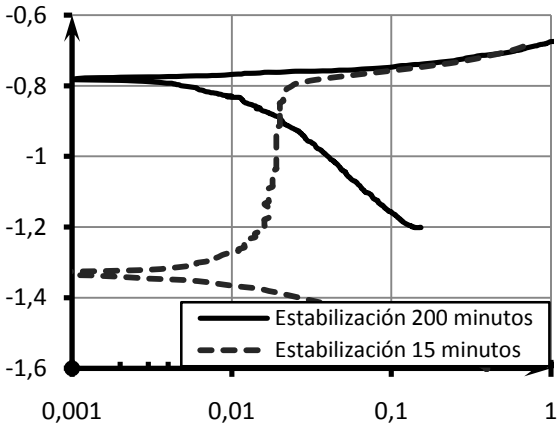
Para la zona de la aleación pura, la **icorr** y el **Ecorr** entre ambos métodos tiene una diferencia del 2,4%. En la zona afectada por el calor, ZAC, la diferencia es del 1%, mientras que en la junta soldada esta diferencia es del 5,2%. Los datos demuestran la validez del tiempo de estabilización de las probetas antes de efectuarse el ensayo.

3.2 Tendencias del Estado Pasivo en las Zonas Analizadas.

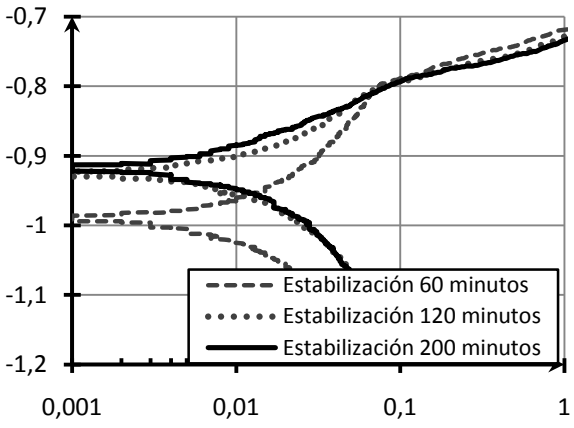
Las figuras 2.25, 2.27 y 2.29 se muestran a continuación.



De acuerdo a los valores obtenidos en el experimento, se observa que el aluminio 5083 tiene un potencial de picadura aproximadamente de 0.8V.



En la ZAC, independientemente del valor de polarización inicial, el valor del potencial de picadura Epic, se mantiene, y es aproximadamente igual a 0,75 V.



La junta soldada tiene un potencial de picadura de 0.8V, independiente de su nivel de polarización.

3.3 Estimación de la Vida Útil de cada una de las Zonas del Sistema Evaluado.

La ecuación (3) define la velocidad de corrosión [1]:

$$CR = 0.129 * \frac{EW * icorr}{\rho} \qquad (3)$$

Según las Tablas V y XIII, el Aluminio UNS-A5083 tiene una densidad de $2.66x10^3$ Kg/m^3 y un Peso Equivalente, EW, de 9,09.

La velocidad de corrosión CR, representa la velocidad de corrosión que ha sufrido un material en unidad de masa con respecto a su superficie en el tiempo

La Tabla XVI recoge los valores calculados para CR.

Tabla XVI

Valores de Velocidad de Corrosión

Estabilización 200 min.	icorr (mA/cm^2)		CR (mpy)	
	TAFEL	RPL	TAFEL	RPL
Metal Base	0,0332	0,034	0,00146	0,00150
ZAC	0,0109	0,011	0,00048	0,00048
Junta	0,0228	0,024	0,00101	0,00106

La Figura 3.7 y 3.8 resume los resultados Obtenidos con cada técnica:

- Técnica de Extrapolación de las **Pendientes de Tafel**.

  Se tienen los siguientes valores en cada Zona:

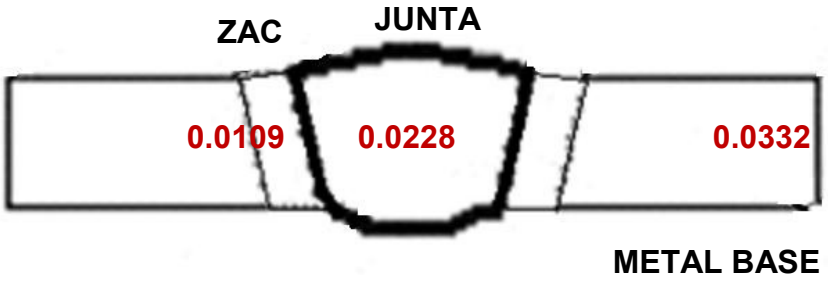


FIGURA 3.7.- Resultados con Tafel

- Técnica de la **Resistencia a la Polarización Lineal.**

  Se muestran los siguientes valores por Zona:

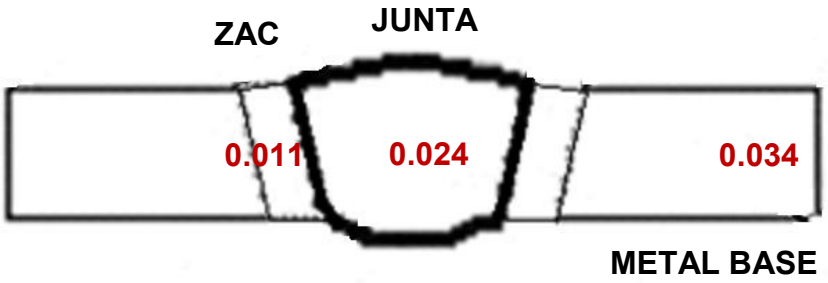


FIGURA 3.8.- Resultados con RPL

Con los resultados obtenidos, tenemos que el cordón actúa como cátodo y el metal base como ánodo. Esto asegura que la relación de

Cátodo sobre ánodo, C/A, sea menor que uno, por lo tanto la velocidad de corrosión es baja.

De los valores de velocidad de corrosión obtenidos, se puede discutir sobre el valor de la velocidad de corrosión de la Zona afectada por el calor ZAC.

Esta Zona, tiene una baja tasa de corrosión, pero así mismo, tiene un valor de potencial de picadura muy cercano a su potencial natural de corrosión. Es decir, si se produjeran cambios ligeros en el potencial, que pueden darse por la presencia de corrientes parásitas, deposición de metales pesados, etc., la primera zona que se picará será la ZAC, pero con una velocidad de corrosión de 0.00048 mpy, que es considerablemente pequeña. Esta velocidad tiene una relación de 10 a 1 con la velocidad con que se corroe la aleación base y la junta soldada (Aleación 5356).

La Tabla XVII muestra el tiempo que debe pasar para que un aluminio sin protección se corroa.

Tabla XVII
Velocidad de Corrosión en mmy

icorr (mA/cm^2)	CR (mpy)	CR (mmy)	CR mm/año		
			3 años	5 años	10 años
0,001	4,41E-04	1,12E-05	3,36E-05	5,60E-05	1,12E-04
0,01	4,41E-03	1,12E-04	3,36E-04	5,60E-04	1,12E-03
0,1	4,41E-02	1,12E-03	3,36E-03	5,60E-03	1,12E-02
1	4,41E-01	1,12E-02	3,36E-02	5,60E-02	1,12E-01
10	4,41E+00	1,12E-01	3,36E-01	5,60E-01	1,12E+00
100	4,41E+01	1,12E+00	3,36E+00	5,60E+00	1,12E+01
1000	4,41E+02	1,12E+01	3,36E+01	5,60E+01	1,12E+02

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.-

Se concluye lo siguiente:

1) De las tres zonas analizadas, la zona del Metal Base presenta una velocidad de corrosión más alta que otras dos zonas. La relación cátodo sobre ánodo, C/A, es menor que la unidad, esto garantiza que esta zona actúe como ánodo, y las otras dos como cátodo.

2) Mientras mayor es el tiempo de estabilización del metal en la celda de trabajo, mejores resultados se obtienen; sin embargo, es notorio que la zona pasiva y transpasiva está plenamente definida, independientemente del tiempo de estabilización.

3) Se comprueba que el método de la Curva de Polarización Potenciodinámica, es válido para obtener la icorr de un metal y obtener información sobre su comportamiento pasivo y transpasivo.

4) La Técnica de la Resistencia a la Polarización Lineal resulta útil y fácil de emplear para determinar la icorr del metal y por tanto obtener rápidamente su velocidad de corrosión.

5) La técnica de la Pendiente de Tafel y la técnica de la Resistencia a la Polarización Lineal, guardan una correlación muy buena, pues los resultados obtenidos con ambas técnicas mantienen un error promedio del 2%.

6) La corrosión es un fenómeno irreversible, y el ensayo de corrosión acelerada es una técnica destructiva que requiere una probeta para cada curva que se desee obtener.

Recomendaciones.-

Se recomienda lo siguiente:

1) El Ensayo Experimental deberá ser único para cada probeta, esto incluye a la solución electrolítica, que deberá ser reemplazada para cada ensayo, pues los productos de la corrosión contaminan la solución.

2) La Técnica de la Curva de Polarización Potenciodinámica debe ser realizada con todas las precauciones del caso. Se recomienda aislar la probeta de trabajo de la varilla conductora mediante la aplicación de un aislante, puesto que la falencia de estar unión impide la correcta lectura de potenciales. Esta fue una de las principales molestias del ensayo realizado.

3) El uso de un puente de Luggin es sumamente necesario para evitar caídas óhmicas. Se recomienda utilizarlo para futuros ensayos.

4) Lo más importante para poder controlar el fenómeno de la corrosión, es conocerla y caracterizarla. Por esta razón se recomienda analizar el ACERO A131, empleado en la industria Naval. Este ensayo podría hacerse con recubrimiento y sin recubrimiento.

5) Es importante emplear como metal de aporte en el proceso de soldadura, un metal que sea catódico con respecto al metal base. Esto garantiza que la relación C/A sea menor que uno, y por lo tanto que la velocidad de corrosión sea baja.

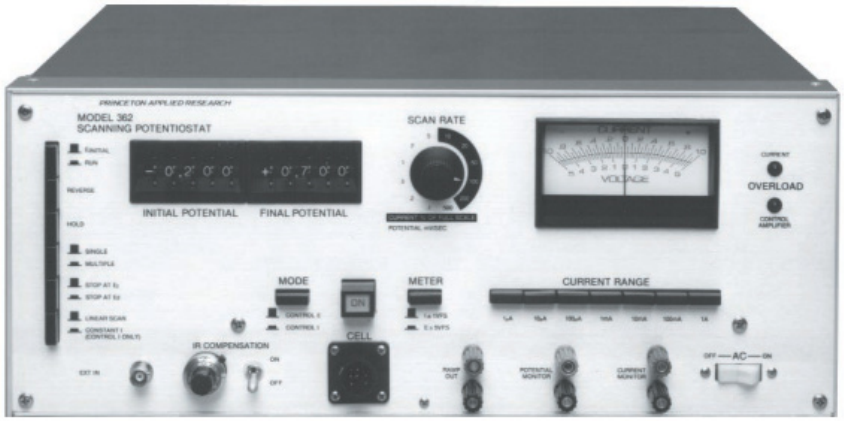
APÉNDICES

APÉNDICE 1:

MANUAL DEL USUARIO DEL SISTEMA DEL POTENCIOSTATO PAR MODELO 362 + MODULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS DAQ NI-6211 + SOFTWARE NI LABVIEW 8.5

Descripción de los Equipos Participantes

Potenciostato PAR Modelo 362



El Potenciostato de escaneado Modelo 362, provee un Potenciostato/galvanostato y un generador de ondas versátil.

El modelo 362 combina un control exacto de potencial-corriente con un amplio rango de tasas de escaneo (SCAN RATE) en un mismo instrumento, que satisfacerá las necesidades de muchos laboratorios electroquímicos. El modelo 362 es ideal para aplicaciones industriales o de investigación.

El Potenciostato provee un control estable de potencial para celdas electroquímicas de parámetros eléctricos variables. Este modelo se aplica a sistemas de electrolitos de alta resistencia, electrodos de alta resistencia (tales como estudios de corrosión de metales pintados o recubiertos), y electrodos de gran área superficial.

Consideraciones especiales de su diseño:

- Sistema de muy bajo ruido, particularmente importante en celdas de baja corriente.
- Compensación de IR (IR COMPENSATION) de retroalimentación positiva, para uso en celdas electroquímicas de alta resistencia.

Puede realizar:

- Barridos lineales o de voltametría (la medida de una corriente eléctrica como función del potencial) cíclica a tasas de escaneo (SCAN RATE) desde 0.1 mV por segundo hasta 5 V por segundo.
- Los escaneos cíclicos pueden ser configurados para un solo ciclo o para formas de onda repetitivas.
- La misma variación de formas de onda de excitación puede ser aplicada en el modo de corriente controlada a tasas de escaneo (SCAN RATE) de hasta 5 A por segundo.

El modelo 362 también es ideal para pruebas de batería ya que se puede aplicar automáticamente a ciclos de corriente constante de carga/descarga entre límites de potenciales preconfigurados.

Las salidas del panel frontal incluyen provisiones para monitorear potencial y corriente durante un experimento. La salida del monitor de potencial (POTENTIAL MONITOR) es un voltaje equivalente al potencial del electrodo de referencia vs. el electrodo de trabajo.

La salida de rampa (RAMP OUT) también da como salida una señal equivalente al potencial aplicado, pero al potencial inicial (INICIAL POTENTIAL), el voltaje en la salida de rampa (RAMP OUT) es cero.

Para flexibilidad adicional, se incluye un conector frontal BNC para aceptar generadores de forma de onda externos.

Módulo de Adquisición de Datos DAQ NI-6211

Este módulo de adquisición de datos fabricado por National Instruments, es un dispositivo alimentado por USB 2.0, por lo que puede ser conectado a cualquier computador que tenga estos puertos sin ninguna alimentación adicional. Tiene entradas y salidas digitales, así como entradas y salidas analógicas.

Estas son algunas de las características del módulo:

- 16 entradas analógicas (16 bits, 250 kS/s)

- 2 salidas analógicas (16 bits a 250 kS/s), 4 entradas digitales, 4 salidas digitales, contadores de 32 bits
- Energizado por bus USB para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
- NI signal streaming para transferencia de datos bidireccional a alta velocidad en USB; la versión OEM está disponible
- Compatible con LabVIEW, LabWindows™/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET
- El software de NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos.

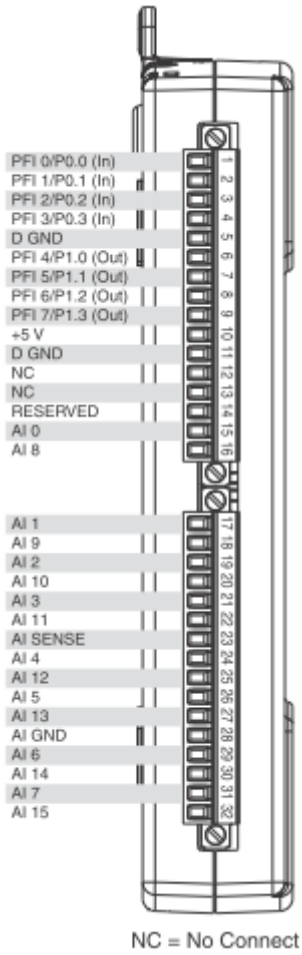
Cabe destacar que los canales analógicos de entrada están multiplexados, por lo que la velocidad de adquisición se dividirá para las entradas que estén siendo usadas.

El dispositivo USB-6211 soporta las siguientes configuraciones de referencia a tierra en las entradas análogas:

- Modo diferencial (DIFF mode): el USB-6211 mide la diferencia de voltaje entre dos entradas análogas (AI signals).

- Modo referencia terminal simple (RSE mode): el USB-6211 mide el voltaje de una señal AI con respecto a la referencia a tierra de las señales analógicas (AI GND).
- Modo sin referencia terminal simple (NRSE mode): el dispositivo mide el voltaje de una señal AI con respecto a la señal AI SENSE.

El pinout de dispositivo 6211:



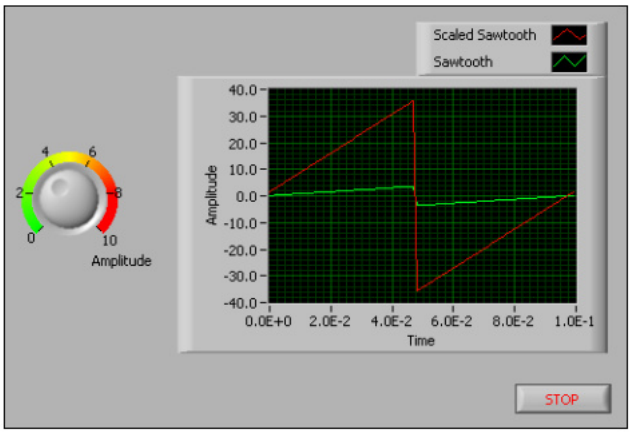
NC = No Connect

Software NI LabView y NI DAQmx

Los programas de LabVIEW son llamados instrumentos virtuales, o VIs (por sus siglas en inglés), porque su apariencia y operación imitan a los instrumentos físicos, como, osciloscopios y multímetros. LabVIEW contiene un completo juego de herramientas para adquirir, analizar, mostrar y almacenar datos, así como también herramientas de ayuda para la programación.

Se puede usar LabVIEW para comunicarse con hardwares como dispositivos de adquisición de datos, visión, y control de movimiento, así como instrumentos GPIB, PXI, VXI, RS232 y RS485. El asistente DAQ es una interface gráfica para interactivamente crear, editar, correr canales virtuales y tareas de NI-DAQmx. Un canal virtual de NI-DAQmx consiste de un canal físico en un dispositivo DAQ y la información de configuración para este canal físico, como rango de entrada y ajuste de escala.

Una tarea NI-DAQmx es una colección de canales virtuales, información de tiempo y disparos, y otras propiedades concernientes a la adquisición o generación.

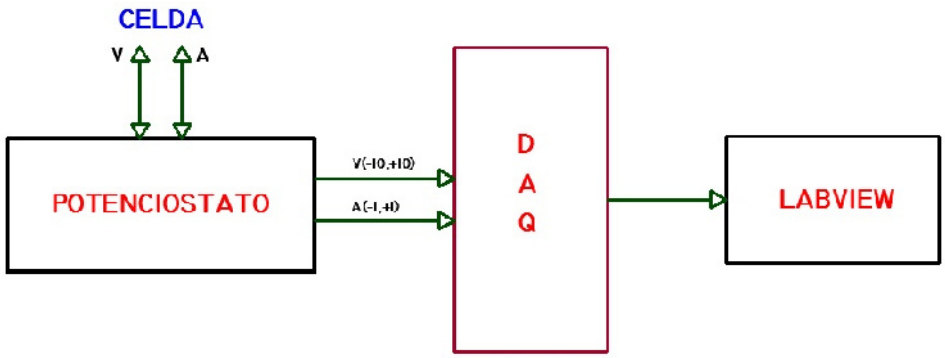


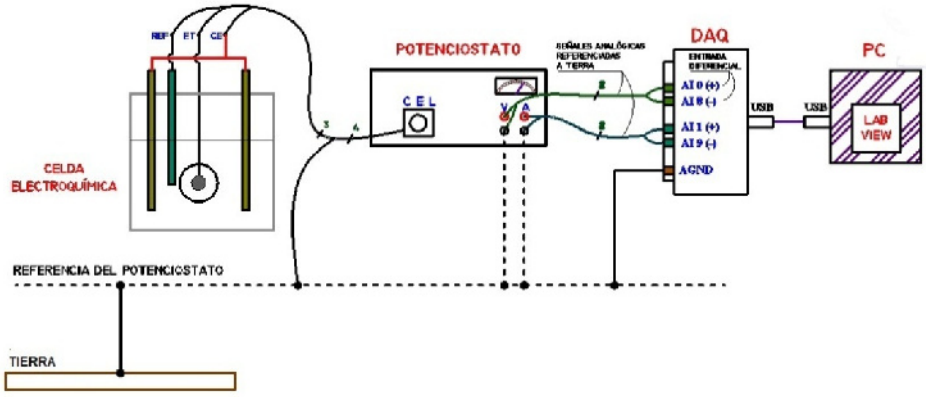
DAQ Assistant

Revisar el tutorial de NI-DAQmx Express para más información sobre como adquirir una señal con LabVIEW.

(Página web: http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2744)

Diagrama de Bloques y Conexiones del Sistema





Conexiones del Potenciostato a la Celda Electroquímica.

El Potenciostato cuenta con un cable de celda C0168 de PAR. Este cable cuenta con 4 hilos empatados con conectores lagarto:

- Electrodo de trabajo
- Electrodo de referencia
- Contraelectrodo
- Referencia del equipo

En la práctica, al contraelectrodo se le ha instalado un empalme con dos terminales para usar dos contraelectrodos**.**

IMPORTANTE: El cable de referencia del equipo se recomienda que se conecte al sistema de puesta a tierra del laboratorio.

Conexiones del Potenciostato al módulo de adquisición de datos.

Los criterios para realizar una adecuada conexión de señales analógicas en el módulo DAQ USB-6211 pueden ser encontradas en el Manual de usuario del equipo.

Aquí señalaremos algunos criterios enfocados al alcance del experimento y los equipos utilizados.

La salida POTENTIAL MONITOR varía de -10VDC hasta +10VDC.

La salida CURRENT MONITOR varía de -1VDC hasta +1VDC.

IMPORTANTE: Las salidas del Potenciostato están referenciadas en su terminal negativo a la misma referencia del cable de la celda, por lo tanto están referenciadas al sistema de puesta a tierra del laboratorio. Por esta razón, las salidas del Potenciostato pueden ser consideradas

como SEÑALES CON REFERENCIA TERMINADA SIMPLE (RSE, REFERENCE SINGLE-ENDED).

Debido a que una de nuestras señales es de nivel bajo (menor de 1 V), y siguiendo las indicaciones del manual de usuario del módulo DAQ, la conexión más recomendable para las entradas la de CONEXIÓN DIFERENCIAL CON FUENTES DE SEÑAL REFERENCIADAS A TIERRA (DIFFERENTIAL CONNECTION WITH GROUND-REFERENCE SIGNAL SOURCE).

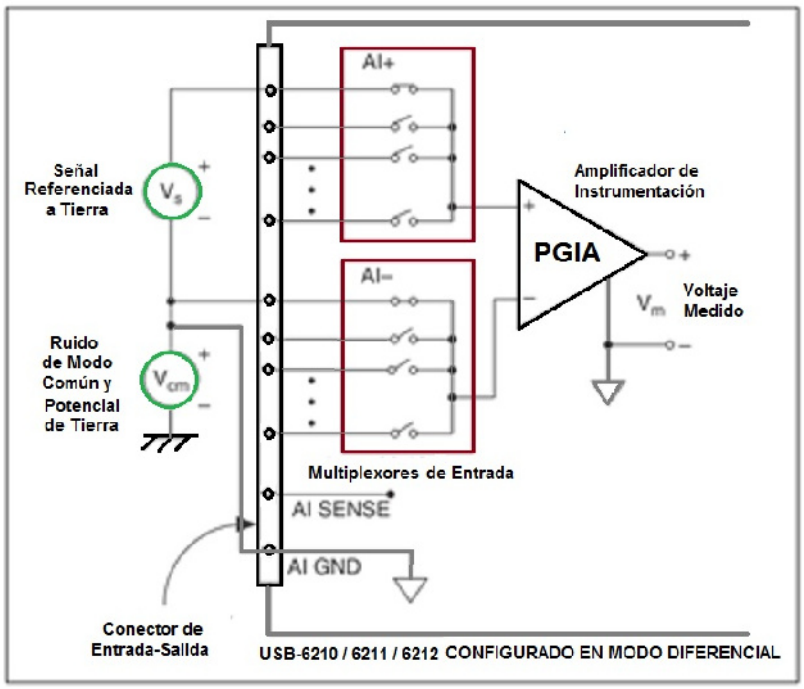
Las conexiones de señales diferenciales disminuyen el ruido que se recoge e incremente el rechazo al ruido de modo común.

Para medidas diferenciales, AI 0 y AI 8 son el terminal positivo y el negativo del canal de entrada diferencial análogo 0. Similarmente, los siguientes pares de señal también forman canales de entrada diferencial:

<AI 1, AI 9>, <AI 2, AI 10>, <AI 3, AI 11>, <AI 4, AI 12>, <AI 5, AI 13>, <AI 6, AI 14>, <AI 7, AI 15>,

<AI 16, AI 24>, <AI 17, AI 25>, <AI 18, AI 26>, <AI 19, AI 27>, <AI 20, AI 28>, <AI 21, AI 29>,

<AI 22, AI 30>, <AI 23, AI 31>



Considerando lo explicado en los párrafos anteriores, las conexiones quedarían de la siguiente manera:

El terminal positivo de la salida POTENTIAL MONITOR (el superior) y el terminal negativo o de referencia (el inferior) se conectarán en el par diferencial de entrada analógica <AI 0, AI 8>.

El terminal positivo de la salida CURRENT MONITOR (el superior) y el terminal negativo o de referencia (el inferior) se conectarán en el par diferencial de entrada analógica <AI 1, AI 9>.

El pin AI GND del módulo DAQ se conectará a la misma referencia del cable de la celda, es decir al sistema de puesta a tierra del laboratorio.

En el experimento se usaron cables ordinarios de cobre como conectores. No se recomienda longitudes mayores a 3 metros. Y si las fuentes de ruido son muy fuertes, es mejor usar cable par trenzado apantallado.

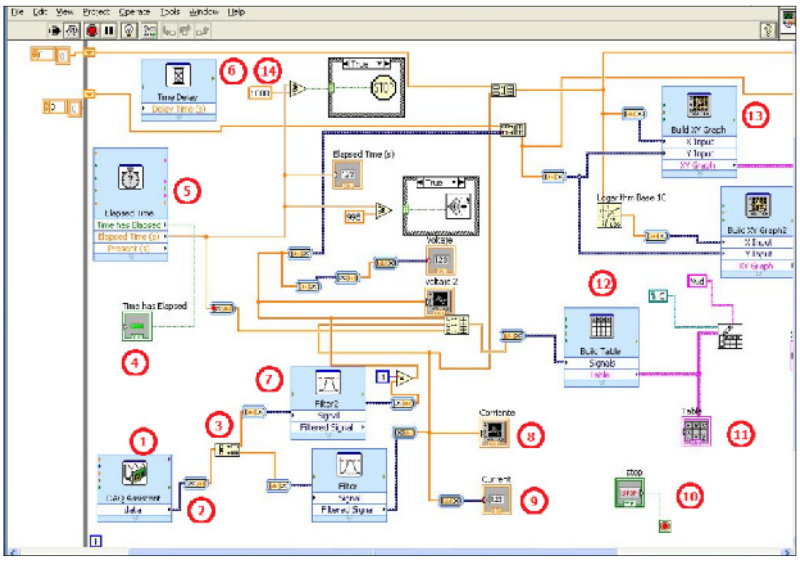
Conexión del módulo DAQ USB-6211 a la computadora.

La conexión se realiza por medio del cable USB 2.0 que vino que el modulo. Debe asegurarse que se conecte a un puerto USB 2.0 que este ubicado en la parte trasera de computador (tarjeta madre o tarjeta PCI). Generalmente se lo encuentra en computadores fabricados desde el año 2000.

Desarrollo del programa de adquisición de datos en LabVIEW

La información básica de cómo empezar a programar en LabVIEW se puede encontrar en el portal web de National Instrument (http://www.ni.com) y en el *Getting Started with LabVIEW.*

En esta guía nos enfocaremos en el VI desarrollado para adquirir los datos del Potenciostato a través del módulo DAQ USB-6211.



Todo VI está compuesto de un diagrama de bloques (figura de arriba) y de un panel frontal (figura de abajo). A cada uno le corresponde una pantalla. Los elementos que se inserten en el panel frontal aparecerán reflejados en el diagrama de bloque y viceversa.

Brevemente identificaremos algunos elementos que componen el diagrama de bloques:

Todos los bloques están contenidos dentro de un *lazo while* que mantiene la ejecución durante el tiempo que su condición sea verdadera. La condición de tiempo de duración (en segundos) se la pre-

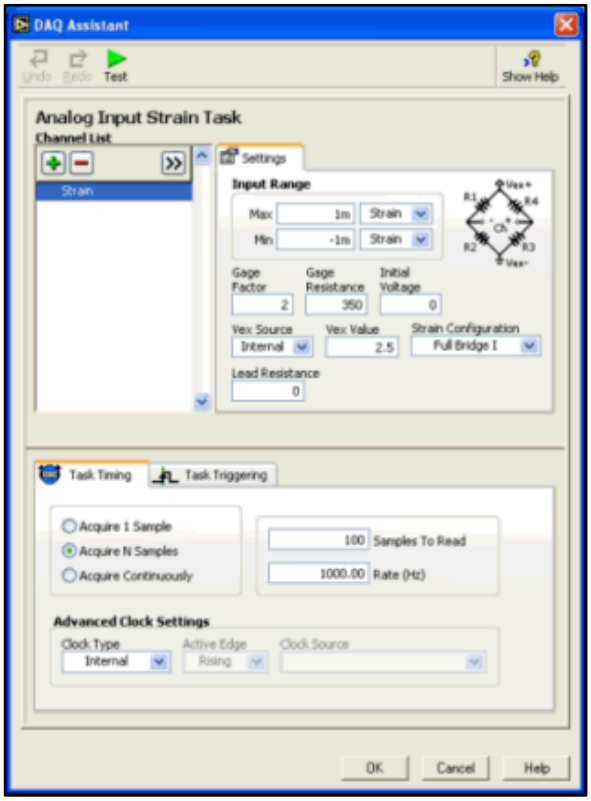
ingresa en el programa por medio de un bloque constante (14). Este tiene una relación lógica con el bloque Elapsed Time (5), el mismo que marca el tiempo en segundos desde que empieza a correr el VI y guarda relación con el tiempo en que dura el barrido del Potenciostato.

Dentro del *lazo while* se encuentra una función Time Delay (6), del tiempo que se le configure, dependerá cada cuanto tiempo se ejecutan las instrucciones que lo acompañan dentro de su mismo lazo.

En el DAQ Assistant (1) se configuran parámetros de las señales que se van a adquirir como rango de voltaje, frecuencia de muestreo, etc.

Se configuran dos canales ai_0 y ai_1. El rango de voltaje es el mismo de las salidas del Potenciostato respectivamente.

El modo de adquisición de N Samples, que significa N muestras, con una frecuencia de muestreo de f en Hz.



Se configura para obtener 100 muestras a una tasa de 1kHz. El intervalo entre toma de muestras es 1 ms. Y esto ocurrirá durante cada iteración del Time Delay. Significa que en 0.1 segundos se tomarán 100 muestras.

Considerando que los valores del voltaje del Potenciostato cambian cada segundo, 100 muestras durante 0.1 segundos parece aceptable, pero esto dependerá del tiempo seteado en el Time Delay. Con un tiempo de 0.5 segundos, solo se tomarían 100 muestras durante 0.1 segundos cada 0.5 segundos. Por consiguiente la cantidad de datos que se obtengan dependerá directamente del **Time Delay.**

El (2), (3) y (4) son convertidores de señales entre elementos e instrumentos.

Los filtros (7) a la salida de las señales de voltaje y corriente son necesarios eliminar las variaciones bruscas que pueden ser asociadas con ruido y suavizar la señal.

Los instrumentos (8) y (9) son visualizador de forma de onda y un visualizar de texto, respectivamente. Un osciloscopio y un multímetro por así decirlo. Los tenemos para el voltaje y la corriente.

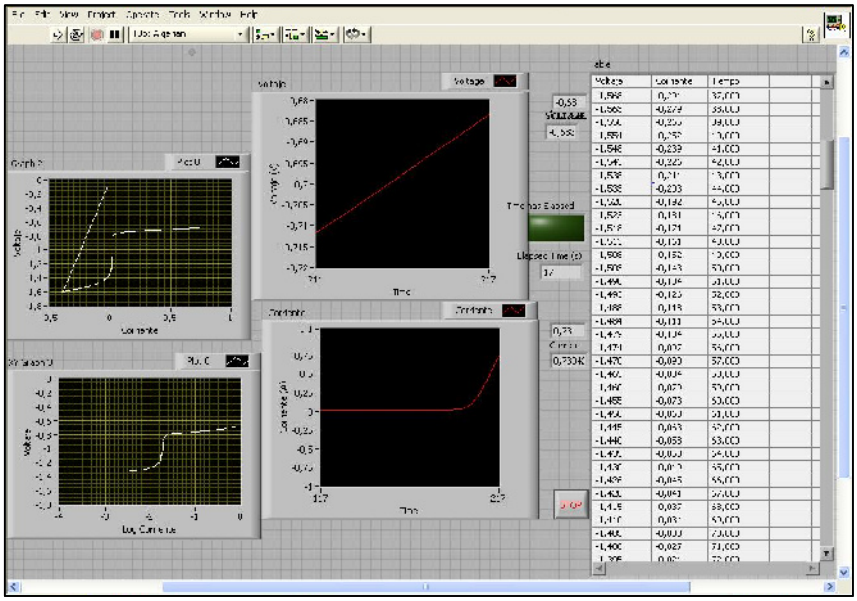
Los bloques (11) y (12) son necesarios para la generación de la tabla que lista los datos adquiridos.

El bloque (13) construye una gráfica X vs Y con la corriente y el voltaje. De la misma manera se incluye una con el logaritmo de la corriente.

El bloque (10) es el STOP que debe ir en todo VI.

Con estas bases ya podemos comenzar nuestro experimento de electroquímica.

Pasos para la Obtención de una Curva Potenciodinámica



1. Proceder a armar la celda, esto es: Probeta de Trabajo, Electrodo de Referencia y Contraelectrodos.
2. Medir el potencial de circuito abierto (Eoc) vs. Electrodo de referencia con la ayuda de un multímetro. Registrar el valor.
3. Conectar los lagartos del cable de la celda en los respectivos electrodos. Ver Diagrama de Conexiones.
4. Encender el Potenciostato (el botón CELL debe estar apagado).
5. Configurar el equipo para que el medidor analógico muestre el voltaje de la celda.
6. Se debería leer un voltaje similar al que marca el multímetro.

7. Esperar entre 60 y 90 minutos a que la celda se estabilice. El valor óptimo de acuerdo a la experiencia del autor es 200 minutos.
8. Encender el computador.
9. Abrir el programa de LabVIEW.
10. Abrir el VI de adquisición de datos.
11. En este momento si se desea se puede empezar a correr el programa para tomar datos de la estabilización del Eoc.
12. Una vez que tenemos una valor estable de Eoc, preparamos la configuración del Potenciostato para el tipo de curva que deseamos obtener:

a. De los botones que están del lado izquierdo, solo debe estar presionado STOP AT EF.
b. El botón de MODE de estar liberado para CONTROL E (potencial).
c. El botón de METER de estar liberado para medir la corriente en la celda.
d. El INITIAL POTENTIAL y el FINAL POTENTIAL deben estar a -400 mV y +400 mV del Eoc. Este rango puede cambiar dependiendo de la electrolito y material del electrodo de trabajo.
e. Setear el SCAN RATE en 1 mV/sec.
f. Setear la escala de corriente en 1 mA o menos.

13. Procedemos a conectar las puntas en los terminales de salida POTENTIAL MONITOR y CURRENT MONITOR. Estas ya deben estar conectadas en el módulo DAQ de acuerdo a lo especificado.
14. Presionamos el interruptor de encendido.
15. Cuando estemos listos presionamos el botón CELL. Este se pondrá de color rojo. Al presionarlo, inmediatamente la celda se polarizará al valor marcado en INICIAL POTENTIAL. En este punto hay que estar muy pendientes de las reacciones del equipo, puede indicar una sobrecarga OVERLOAD. Si esto sucede realizar lo siguiente:

a. Aumentar el rango del monitor de corriente hasta que la alarma por sobrecarga desaparezca.
b. Esperar unos segundos, e ir disminuyendo el rango del medidor de corriente a medida que se va reduciendo la corriente, hasta que se detenga y estabilice.
c. Esperar unos 10 minutos en esa condición.

16. En este punto es recomendable conectar un multímetro analógico o digital en los terminales de POTENTIAL MONITOR para seguir y corroborar la variación del voltaje durante el barrido.
17. Cuando estemos listos presionamos el botón EINTIAL/RUN para que quede en su posición de RUN. Automáticamente comenzará el barrido.

18. La duración del barrido se la puede hallar con el cociente de los milivoltios totales del barrido sobre el scan rate. Este tiempo es el que debe ser configurado en bloque de constante (14) del diagrama de bloques del VI. RECUERDE QUE EL VI DEBE ESTAR CORRIENDO ANTES DE PRESIONAR EL BOTÓN.
19. Seguir muy atentamente los valores que toma la corriente, cuando este por sobrepasar la escala seteada, rápidamente cambiar a la siguiente, de esta manera evitaremos la alarma de OVERLOAD.
20. Cuando el voltaje alcance el valor de FINAL POTENCIAL el barrido finalizará automáticamente.
21. Ahora en el VI dar click en el botón de STOP de la barra de herramientas (NO EN EL DEL VI PORQUE SE BORRAN LOS DATOS DE LA TABLA).
22. En la barra de herramientas ahora aparece un icono de un VISTO, dar click en él para exportar la tabla de datos a un archivo compatible con Microsoft Excel llamado Libro 1 ubicado en la siguiente dirección: C:/escritorio/Javier/graf/Libro1.xls
23. FIN.

APÉNDICE 2:

Certificación del Material Aluminio UNS A-5086: Packing Slip.

CHARLESTON ALUMINUM, LLC - FL
7890 NW 98th STREET
HIALEAH GARDENS, FL 33016

System Date/Time:
03/18/10 1:41PM

PH: (305) 558-4644 FAX: (305) 558-7202

PRO-FORMA

PACKING SLIP Page

SALES ORDER NO. :	S84772
ORDER DATE :	02/26/10
DUE DATE:	03/16/10

INDUSTRIAL MARINE SERVICE
GARZOTA MZ 89 V 24
RUC:0905057600001
GUAYAQUIL
ECUADOR

KRYSTAL LOGISTICS USA
C/O INDUSTRIAL MARINE SERVICES
10301 NW 108TH AVENUE-STE 11
MIAMI, FL 33178
USA

PURCHASE ORDER NUMBER	CUST	SALESPERSON	WHS	TAX	MTR	TERMS
109-INT	24065	CARLOS MOCZA	8	1		C.I.A.
SHIP VIA: CA TRANSPORT-		FLA DELIVERED				CAPT.JORGE F.RUIZ

LN	QUANTITY ORDERED	QUANTITY SHIPPED	U M	DESCRIPTION			
1	39		EA	ALUMINUM DIAMOND TREAD PLATE 5083-H116 0.188" X 48" X 192"		8 39	7145
Alc:	9 pcs			0.188" X 48" X 192"	638984		(701997
Alc:	21 pcs			0.500" X 48" X 192"	634712		(305954
Alc:	9 pcs			0.188" X 48" X 192"	632967A		(305876
	39						
2	120		EA	ALUMINUM STRCTRL. ANGLE 5086-H111, AMER. STAND. 2.000" X 2.000" X .188" X 300"		8 120	2550
Alc:	20 pcs			2.000" X 2.000" X .188" X 300"	35657		(6931-F-40
Alc:	100 pcs			2.000" X 2.000" X .188" X 300"	1366378		(6864567
	120						
3	22		EA	ALUMINUM PIPE 5086-H32 DRAWN SEAMLESS 1.000"SCH.80 X 240"		8 22	330
Alc:	22 pcs			1.000"SCH.80 X 240"	09110608-2		(20-091106)
	22						
4	2		EA	ALUMINUM PIPE 5086-H32 DRAWN SEAMLESS 2.000"SCH.80 X 240"		8 2	69
Alc:	2 pcs			2.000"SCH.80 X 240"	D911		(43-7509
	2						
	TOTAL:	6061T6DT		TOTAL WEIGHT:			

COMMENTS:

SUBTOTAL:	
TAX:	
FREIGHT:	
TOTAL:	

QA-88-0308

INSPECTION CERTIFICATE

Date. 13. Aug. 2008

stomer	FURUKAWA SANGYO CO.,LTD.	Order No.	T0008	DOCUMENT	
slination	HT INTERNATIONAL CO., LTD		S19-HT-100569	SPEC.	ASTM B928
oducts		Size	0.5X72X240	SECTION	60 06
			12.7 X1,828.8 X 6,096	Process No.	JF 62760
terial	5083 - H116			Shipped Quantity	4 1,506KG

Chemical Composition (wt%)		SI	FE	CU	MN	MG	CR	ZN	TI	CR-EQ	(OTHERS) EACH	(OTHERS) TOTAL	AI
	MIN.				0.40	4.0	0.05						RE
Spec.	MAX.	0.40	0.40	0.10	1.0	4.9	0.25	0.25	0.15	0.311	0.05	0.15	
otNo.													
1637-200		0.07	0.20	0.02	0.64	4.6	0.06	0.01	0.01	0.210	0.00	0.01	RE

Item Temper		TENSILE STRENGTH KSI	YIELD STRENGTH KSI	ELONGATION %	EXCO TEST	NAMLT TEST
Spec. H116	MIN.	44.0	31.0	12		
	MAX.					
otNo.						
1637-200	H116	48.4	36.3	18.1	OK	OK

Inspection

APPEARANCE GOOD
DIMENSION GOOD
MARKING GOOD

SURVEYOR TO AMERICA BUREAU OF SHIPPING

ument:

We hereby certify that the material covered by this report has been inspected in accordance with, and has been found to meet, the applicable requirements described herein, including any specifications forming a part of the description and that samples representative of the material met the composition limits and has the mechanical properties shown on the face of this sheet.

Furukawa-Sky Aluminum Corp. Fukui Works
MIKUNI-CHO, KUROME21-1, SAKAI-CITY, FUKUI PREF., 913-8588 JAPAN

Manager of Quality Assurance Department

Per. K. Imagaki

APÉNDICE 3:

Propiedades Mecánicas, Físicas y Corrosivas del Aluminio UNS-A5083

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

Temper	Proof Stress 0.2% (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Elong -ation A5 (%)	Elong -ation A50 (%)	Hard -ness Brinell HB	Hard- -ness Vickers HV	Fatigue Endur. Limit (MPa)
H2	240	330	185	17	16	90	95	280
H4	275	360	200	16	14	100	105	280
H6	305	380	210	10	9	105	110	
H8	335	400	220	9	8	110	115	
H9	370	420	230	5	5	115	120	
O	145	300	175	23	22	70	75	250

PHYSICAL AND ELASTIC PROPERTIES

Temper	Dens -ity kg/m^3	Coeffic. Thermal Expans. µm/m/K	Spec. Heat Cp J/kgK	Melting Point Liquid -us (°C)	Melting Point Solid -us (°C)	Electr. Conduct -ivity (%IACS)	Electr. Resist -ivity (nohmm)	Thermal Conduct -ivity (W/mK)
H2	2660	23.8	899	640	580	28.5	60.0	117.0
H4	2660	23.8	899	640	580	28.5	60.0	117.0
H6	2660	23.8	899	640	580	28.5	60.0	117.0
H8	2660	23.8	899	640	580	28.5	60.0	117.0
H9	2660	23.8	899	640	580			
O	2660	23.8	899	640	580	28.5	60.0	117.0

Temper	Modulus of Elasticity (MPa)	Modulus of Rigidity (MPa)	Poisson's Ratio
All	71000	26800	0.330

CORROSION AND ANODISING PROPERTIES

	Atmospheric Corrosion (2-7)				Local Corrosion (2-7)			
Temper	General	Industrial	Marine	Rural	Exfoliation	Intercrystalline	Pitting	Stress Corrosion
H2	6	6	6	6	6	5	6	5
H4	6	6	6	6	6	5	6	4
H6	6	6	6	6	6	5	6	5
H8	6	6	6	6	6	5	6	5
H9	6	6	6	6	6	5	6	4
O	6	6	6	6	6	5	6	6

	Anodising (2-7)			
Temper	Bright	Colour	Hard	Protective
All	4	5	6	6

COLD FORMABILITY, MACHINABILITY,WELDABILITY

	Cold Formability (2-7)				Machin	Weldability (2-7)				Braza	Sold
Temper	Gene -ral	Deep Draw -ing	Stretch forming	Spinn -ing	-abil -ity	Elect -ron beam	Oxy- gas	MIG /TIG	Spot Seam	-bil -ity	-era -bil -ity
H2	5	4		4	4	6	4	6	6	3	3
H4	4	4	4	4	5	6	4	6	6	3	3
H6	4				5	6	4	6	6	3	3
H8	3	3		3	5	6	4	6	6	3	3
H9	3				5	6	4	6	6	3	3
O	5	5	5	5	4	6	4	6	5	3	3

PRODUCT FORMS

Bar Profile Section Shape Plate Sheet Tube Wire

Printed from: ALUSELECT Databank

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DENNY A. JONES. “Principles and Prevention of Corrosion”, 1992.
2. T. HOWARD ROGERS. “The Marine Corrosion Handbook”. McGraw-Hill. Canadá. Pp. 3-41, 1992, 1960.
3. J.R.GALVELE, G.S. DUFFÓ. Degradación de Materiales de Corrosión. Editado por Instituto Sábato, p.19:22, 2006.
4. ENRIQUE VERA LÓPEZ. Uso de Métodos Electroquímicos como Herramientas para Evaluar Parámetros de Interfase en Sistemas Heterogéneos Metal/Medio Acuoso. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
5. MAITE BAILE. Estudio de Corrosion del Aluminio. Capítulo 8.
6. TALAT – 5103 (1994). “Corrosion Control of Aluminium - Forms of Corrosion and Prevention”, p.12, 2005.
7. J.R.GALVELE, G.S. DUFFÓ. Degradación de Materiales de Corrosión. Editado por Instituto Sábato, Capítulo 6, 2006.
8. TALAT – 5101 – 5102 – 5105 (1994). “Surface Characteristics of Aluminium and Aluminium Alloys”.