Instituto Panamericano de Ingeniería Naval
Instituto Pan-americano de Engenharia Naval
Pan-american Institute of Naval Engineering

XI CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA.

SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSION INTERGRANULAR DE UNIONES SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AISI 304.

PAPER Nº 10

ERNESTO ZUMELZU DELGADO
Director Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos
Universidad Austral de Chile
CHILE

132

SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSION INTERGRANULAR DE UNIONES SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AISI 304.-

Zumelzu E.

RESUMEN

En la soldabilidad aceros inoxidables austeníticos Cr-Ni, tipo AISI 304, hay implícito diversos fenómenos metalúrgicos como ser la tendencia al agrietamiento, la eventual formación de una fase sigma y la precipitación de carburos de cromo en los límites de grano. Esto último es causa de la corrosión intergranular de dichos aceros, lo cual puede llevar a estos materiales a presentar fallas en servicios, con importantes costos comprometidos en la fabricación y operación de partes soldadas.-

Los objetivos del trabajo son estudiar, mediante ensayos experimentales, el comportamiento mecánico y bajo corrosión por solución de salmuera en inmersión estática, de uniones soldadas de acero inoxidable 304. Se usó el proceso de soldadura Arco Manual y sistema TIG, con séis diferentes tipos de materiales de aporte comerciales, utilizadas en estanques de almacenamiento de carga o de gas, redes de cañerías, ductos de refrigeración, tubos de intercambiadores de calor, entre otras aplicaciones.-

Los resultados experimentales muestran cual es el material de aporte más apto, comparando los índices de corrosión ontenidos para las uniones soldadas, la presencia de ferrita delta y, considerando los costos involucrados en los procesos de soldadura.-

Ernesto Zumelzu Delgado, Director del Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos, Universidad Austral de Chile.-

1.- INTRODUCCION.-

El extenso uso de juntas soldadas en equipos y estructuras expuestas a la corrosión ha hecho necesario simular ensayos experimentales, para descubrir si el metal de aporte resistirá satisfactoriamente la corrosión, y si los efectos térmicos asociados con las operaciones de soldadura han afectado, en cualquier forma, la resistencia a la corrosión del metal base cerca de la soldadura.-

Se sabe que principalmente tres fenómenos condicionan la soldabilidad de los aceros austeníticos con cromo niquel:

a) la tendencia al agrietamiento o fisuración en caliente
b) la formación de una fase intermetálica, para ciertas concentraciones de cromo a determinadas temperaturas, causa de la fragilidad del acero y,
c) la precipitación de carburos de cromo en los bordes o límites de grano, produciéndose un empobrecimiento en cromo con respecto a la matriz austenítica del material, causa de la corrosión intergranular.-

Dichos fenómenos, por acción de la temperatura se manifiestan de forma compleja puesto que participan diversos factores como ser: fases sólidas, modo de solidificación, acción de aleantes, reacciones del carbono, tiempo de permanencia, etc. Se tiene por ejemplo que dichos aceros, cuando son sometidos a un proceso de soldadura por fusión sufren una transformación tal, que queda retenida la fase delta, en una proporción que depende por un lado del ciclo térmico de soldadura (1) y, por otro, de los equivalentes en cromo y en niquel de la aleación formada entre el material depositado y el material base.-

Además debe considerarse que durante la solidificación del cordon de soldadura, estos aceros pueden presentar problemas de fisuración a altas temperaturas, lo que empiricamente ha sido relacionado con la presencia de ferrita delta (2). La presencia de dicha fase en las uniones soldadas se considera actualmente como beneficiosa para la conformación en frío para evitar la fisuración en caliente y mejorar la resistencia mecánica (3), sin embargo, se considera perjudicial frente a ciertos agentes corrosivos, de forma que no existe un criterio unificado que aconseje un límite de ferrita delta que evite la corrosión de estos materiales soldados.-

Pero, el fenómeno más significativo en las uniones soldadas de aceros inoxidables es la corrosión intergranular, por las variaciones de composición en los límites de grano, debido a la precipitación de carburos; en éste caso, el daño aparece al exponerse el material a un medio corrosivo, en el que se produce corrosión a lo largo de los límites de grano a una velocidad que depende de la agresividad del medio y del grado de sensibilización (4).-

De ahí, que el objetivo del presente trabajo es estudiar experimentalmente, mediante condiciones simuladas, el comportamiento mecánico y de corrosión en una solución de salmuera al 36%, de uniones soldadas de acero inoxidable AISI 304, por el proceso de soldadura Arco Manual y TIG. Estas uniones son con nueve diferentes materia -

133

les de aporte, lo cual permitirá conocer la calidad final de la soldadura y sus costos, para los diseños de fabricación y operación.-

2.- MATERIAL Y METODO

2.1.- Material Base y Materiales de Aporte.- El metal base es un acero inoxidable austenítico, tipo AISI 304, de 3 mm. de espesor, cuya composición química se indica en la Tabla 1.-

Tabla 1. Composición Química Promedio Acero AISI 304

Análisis	% Cr	% Ni	% Mn	% C	% Fe
EDX/ZAF	18.2	7.9	2.0	-	(balanceado)
Leco	-	-	-	0.08	-

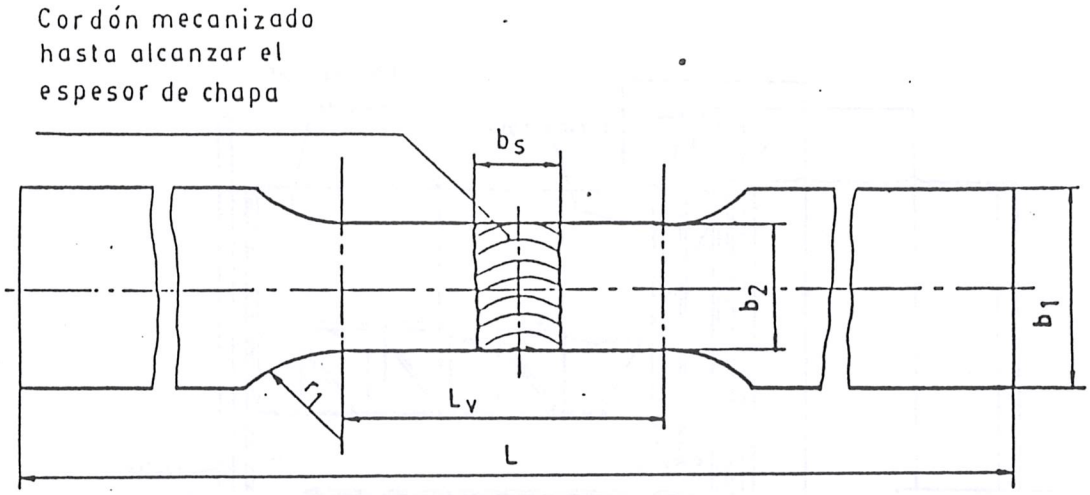
Como materiales de aporte, para la confección de probetas normalizadas, se emplearon los indicados en la Tabla 2, todos con posición para soldar vertical ascendente.-

Tabla 2. Materiales de Aporte y Proceso de Soldadura

N° de Probeta	Material de Aporte	Diametro Electrodo	Sistema Soldadura
A1	Tigtectic A (AISI 304 ELC)	1/16"	TIG
B1	Indura 308 L (ER-308 L)	1/16"	TIG
C1	Hilarius 316 L (AISI 316 L)	3/32"	TIG
D1	Eutectrode 680 #	1/8"	Arco Manual
E1	Eutectrode 55 (E 347-16)	3/32"	Arco Manual
H1	Xuper 680 CGS #	1/8"	Arco Manual
K1	Indura 29-9 (E 312-16)	1/8"	Arco Manual
O1	Indura 19-9 (E 308-16)	1/8"	Arco Manual
X1	Indura 316 L (E 316-16)	1/8"	Arco Manual

2.2.- Ensayos de Tracción.- El ensayo de tracción es el procedimiento más usado para determinar resistencia y se emplea para la clasificación de materiales base y de aportación, para catalogar la resistencia de las uniones soldadas y, en parte, para control de la habilidad de los soldadores.-

Para el ensayo de tracción se confeccionaron 9 probetas, soldadas a tope, de 3 mm. de espesor según norma DIN 50120, con los procesos TIG y Arco Manual, las cuales previamente se inspeccionaron por Rayos X según DIN 5411 con equipo Balteau de intensidad de radiación hasta 210 Kv, para determinar los defectos de soldadura. La Figura 1 muestra la forma de la probeta de tracción plana y sus correspondientes dimensiones dependiendo del espesor de chapa a soldar.-



L	: 250 mm.	b1	: 20 mm.
Lv	: 15 mm.	b2	: 15 mm.
r1	: 10 mm.	b3	: 7 mm.

Figura 1. Forma de la Probeta de Tracción Plana

2.3.- Ensayo de Corrosión Inmersión Total.- Los ensayos de laboratorio sobre resistencia a la corrosión son comúnmente el medio más rápido y más satisfactorio para llegar a una elección preliminar de los materiales más adecuados. Sin embargo, no es posible predecir con exactitud el comportamiento del material, dado que participan en el proceso de corrosión además otros factores significativos: presencia de oxigeno, temperatura, velocidad del líquido corrosivo, concentración local, impurezas, etc. De ahí que el ensayo utilizado de inmersión total asimilado al ASTM A 279 y NACE TM-01-69, permite determinar una aproximación de resultados concordante a los que se obtienen en gran escala cuando se consideran las demás variables (5).-

El ensayo simulado para condiciones del medio salino, consiste en una inmersión total de las probetas normalizadas de uniones soldadas, con una área expuesta de 24.5 cm^2, por un tiempo de ensayo de 121 horas en una solución de Na Cl saturada al 36% con PH 6, a la temperatura de 18 °C $\pm$ 2 °C con una velocidad nula entre solución y muestra.-

El efecto de la solución salina sobre el acero se mide por la determinación de la pérdida de peso de las muestras, de acuerdo a índices de corrosión que se expresan, entre otros, en pulgadas de penetración por mes. En la Figura 2 se observa un esquema del montaje utilizado para el ensayo de corrosión conteniendo las probetas de uniones soldadas; la Tabla 3 enumera las probetas para dicho ensayo.-

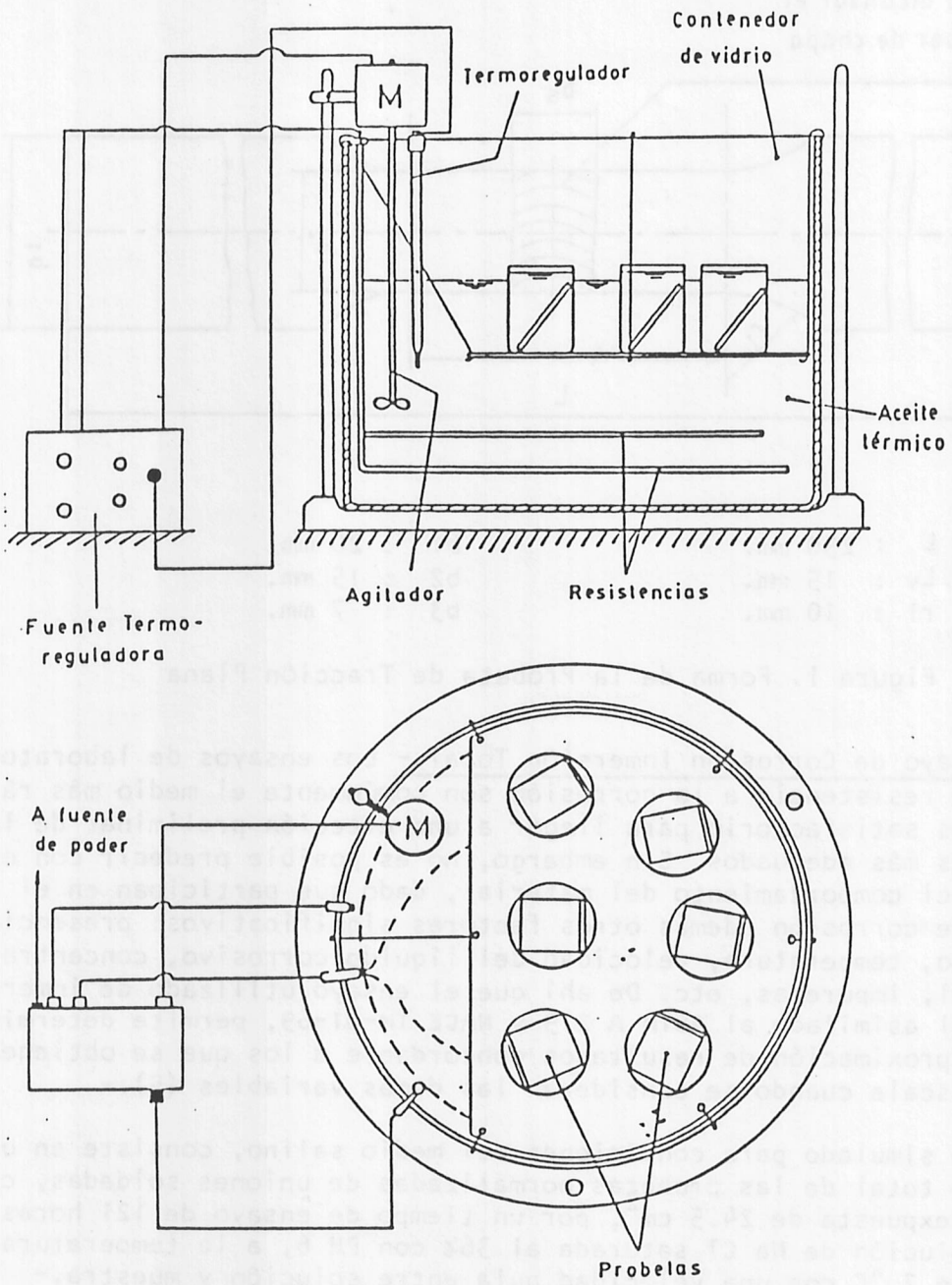


Figura 2. Montaje Ensayo de Corrosión

Tabla 3. Enumeración de las Probetas de Corrosión

Probeta serie N°	Sistema Soldadura	Material de Aporte	Diametro Electrodo	N° Ensayo R-X
A1	TIG	Tigtectic A	1/16"	1
B1	TIG	Indura 308	1/16"	3
C1	TIG	Hilarius 316 L	3/32"	5
E1	Arco Manual	Eutectrode 680	1/8"	7
H1	Arco Manual	Eutectrode 55	3/32"	9
L1	Arco Manual	Xuper 680 CGS	1/8"	11

Para el ensayo anterior fue necesario separar los productos de corrosión de las muestras, para permitir una medición satisfactoria de las pérdidas de peso, lo cual se realizó mediante un limpiado electrolítico. Para ello, las muestras se trataron durante un período de tres minutos a 74 °C con una solución de ácido sulfúrico al 5% con inhibidores de tuoleno; aplicándose a la muestra catódica una densidad de corriente de 20 Amp./dm^2 con un ánodo de carbón. Puesto que en los ensayos no se consideraron las variables que pudieran afectarlos, se consideró un margen de seguridad en los resultados obtenidos, con un factor de 0,5 y estimado por las normas (5).-

2.4.- Metodología de Trabajo.- Para la confección de las probetas se utilizaron dos procesos de soldadura. Si bién es cierto, el sistema más adecuado en la soldabilidad de materiales de espesores delgados es el TIG (6), para la ejecución de los trabajos también se utilizó el sistema Arco Manual debido a que los electrodos empleados están adaptados para dicho sistema, ya que lo que se pretende principalmente es emplear en la práctica el material de aporte más adecuado. Se confeccionaron 18 probetas soldadas, dos para cada material de aporte, de las cuales la mitad fueron para el ensayo de tracción y las restantes para el ensayo de corrosión. Enseguida se efectuó una inspección visual y radiográfica, para seleccionar las mejores probetas y después realizar los ensayos de tracción y corrosión, tal como se indica en el flujograma de la Figura 3.-

Se seleccionaron además las probetas con mejores comportamientos mecánicos y de corrosión, para una observación microscópica y por scanning, con el fin de estimar en forma aproximada el porcentaje de ferrita delta y analizar su morfología en la zona de ataque térmico de las uniones soldadas de acero inoxidable AISI 304.-

3.0.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.-

Previos a los ensayos de tracción y de corrosión, por examen visual de las probetas se descartaron los materiales de aporte Indura 29-9, Indura 19-9 e Indura 316 ELC soldados por Arco Manual, las que presentaron una fusión muy irregular y excesivo material de aporte en el cordon de soldadura.-

3.1.- Ensayos de Tracción.- También previos a estos ensayos, las probetas seleccionadas se analizaron por Rayos X, las cuales mues -

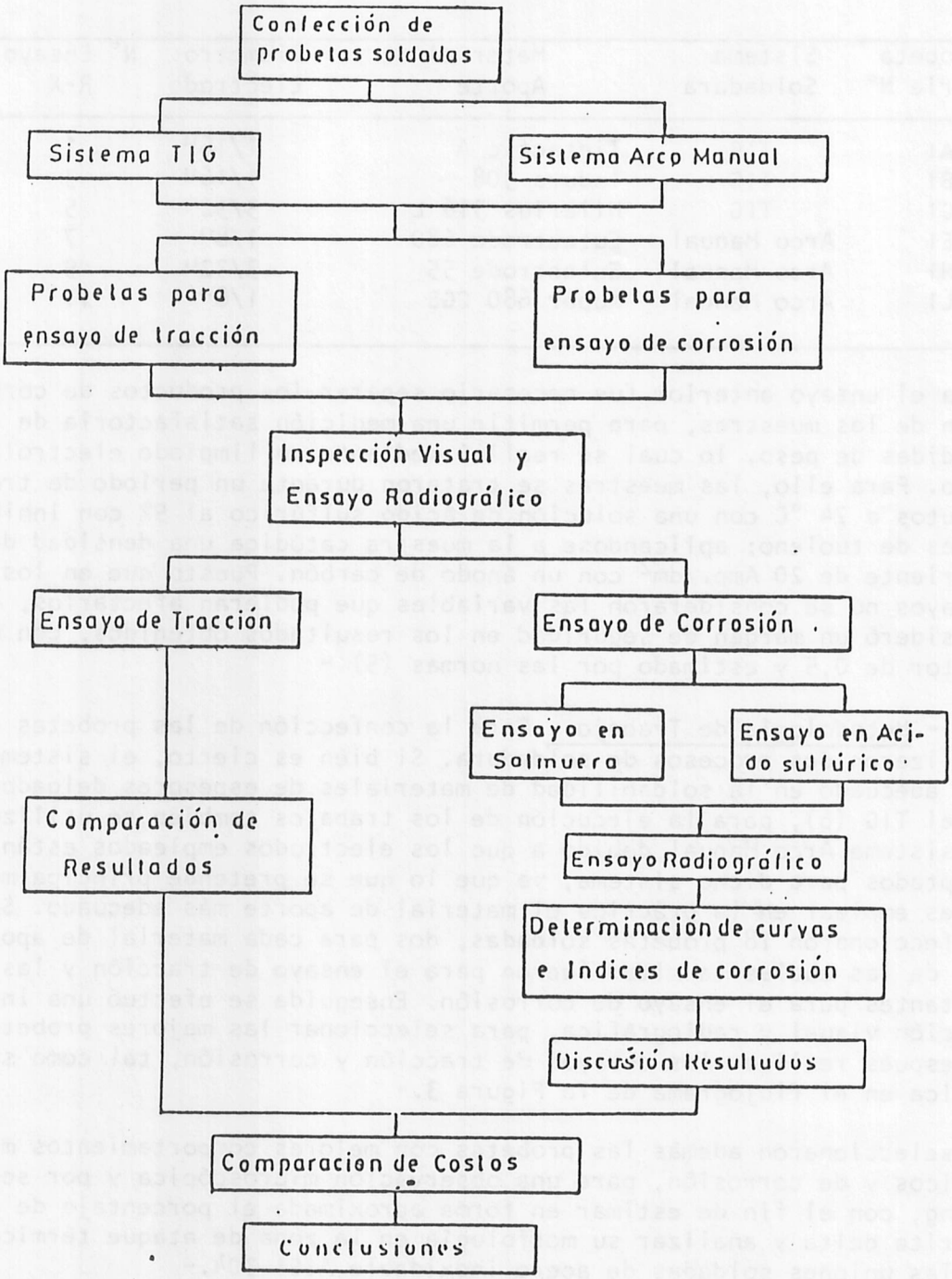


Figura 3. Flujograma y Secuencia Ensayos

tran un trabajo aceptable según las normas, sin anomalías importante, a ecepción de pequeños porcentajes de inclusiones de gas en los extremos, algún poro y pequeñas socavaciones que no influyen en la calidad de las uniones soldadas.-

La Tabla 4 proporciona los resultados de los ensayos de tracción de las distintas probetas soldadas con los diversos materiales de aporte.-

Tabla 4. Resultados Ensayos de Tracción Uniones Soldadas.-

Probeta	A1	B1	C1	D1	E1	H1	K1	O1	X1
$R\ T_f$	65	56	s/i	85	65	85	84	63	62
$R\ T_e$	43	35	33	37	38	39	43	42	38

RT_f : Resistencia a la tracción fabricante (kg/mm^2)

RT_e : Resistencia a la tracción experimental (kg/mm^2)

Las diferencias obtenidas para los valores de resistencia a la tracción de las probetas ensayadas y del fabricante se deben, en las uniones soldadas, principalmente a la formación de poros y socavaciones en el cordon de soldadura favorecidas por la concentración de tensiones en puntos defectuosos. La superficie de fractura presentó una apariencia granular en que predominó la fractura por microfisuras,especialmente en puntos detectados previamente por el ensayo de Rayos X, ubicados en el centro del cordon o en el límite entre éste y el metal base. Dichas fallas de soldadura en las uniones de acero inoxidable AISI 304 limitarán la resistencia mecánica de las aplicaciones de ingeniería.-

3.2.- Ensayo de Corrosión.- En la Tabla 5 se entregan antecedentes de las pérdidas de peso neto de cada probeta durante el ensayo, así como la pérdida de peso por efecto del limpiado electrolítico y los índices de corrosión expresados en milésimas por año (mpy), milígramos por decímetro cuadrado por día (mdd) y pulgadas de penetración por año (ipy).-

La corrosión es apreciable en la mayoría de las probetas especialmente en las zonas de alteración térmica.-

Tabla 5. Indices de Corrosión de Probetas Sometidas a Ensayos de Corrosión en Salmuera.-

Probeta N°	Pérdida peso por limpiado W1 .5 (grs)	Pérdida de peso neto W (grs)	Indices de Corrosión mpy	mdd	ipy.10-2
A1	0,210	0,1884	27,69	156,90	2,74
B1	0,239	0,1722	25,32	139,00	2,50
C1	0,231	0,0948	13,94	76,51	1,40
E1	0,240	0,1715	25,21	138,40	2,49
H1	0,220	0,1506	22,14	121,50	2,20
L1	0,242	0,1110	16,32	89,57	1,62

Las Figuras 4 y 5 muestran las curvas de corrosión versus tiempo para las probetas sometidas al ensayo de corrosión en salmuera. Se tiene que el material de aporte Hilarius 316 L, en las uniones soldadas, presenta el mejor comportamiento de resistencia a la corrosión con una velocidad menor a las restantes probetas. Le siguen los materiales de aporte Xuper 680 CGS e Indura 308 L.

3.3.- Ensayos de Dureza.- En la Tabla 6 se proporciona información de la dureza de las dos probetas que presentaron mejor resistencia a la corrosión en el ensayo de inmersión total. Las mediciones de dureza son cada 3 mm. observándose un incremento en las zonas de interfase y zona de fusión, lo que caracteriza los cambios de propiedades mecánicas por influencia de los elementos químicos de los materiales de aportes, el proceso y control de soldadura elegido.-

Tabla 6. Dureza del Depósito, ZAT y Metal Base

Dureza R_b / Muestra	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6
Hilarius 316 L	75	76	80	80	77	77	79	78	71	79	93	74
Xuper 680 CGS	72	80	80	80	79	87	82	76	79	77	75	74

3.4.- Observaciones Metalográficas.- El porcentaje de ferrita delta aproximado, observado metalograficamente, muestran valores entre 2-12 % a diferencia de los valores teoricos que se obtienen en el Diagrama de Schaefler, que considera la composición química de los electrodos utilizados, porcentajes entre 2 al 30%, no existiendo por lo tanto una correlación de cantidades. Se observa además corrosión en zona de dilución y las diferentes orientaciones de las dendritas del metal depositado.-

4.- CONCLUSIONES.-

Del presente trabajo se desprenden las siguientes conclusiones generales:

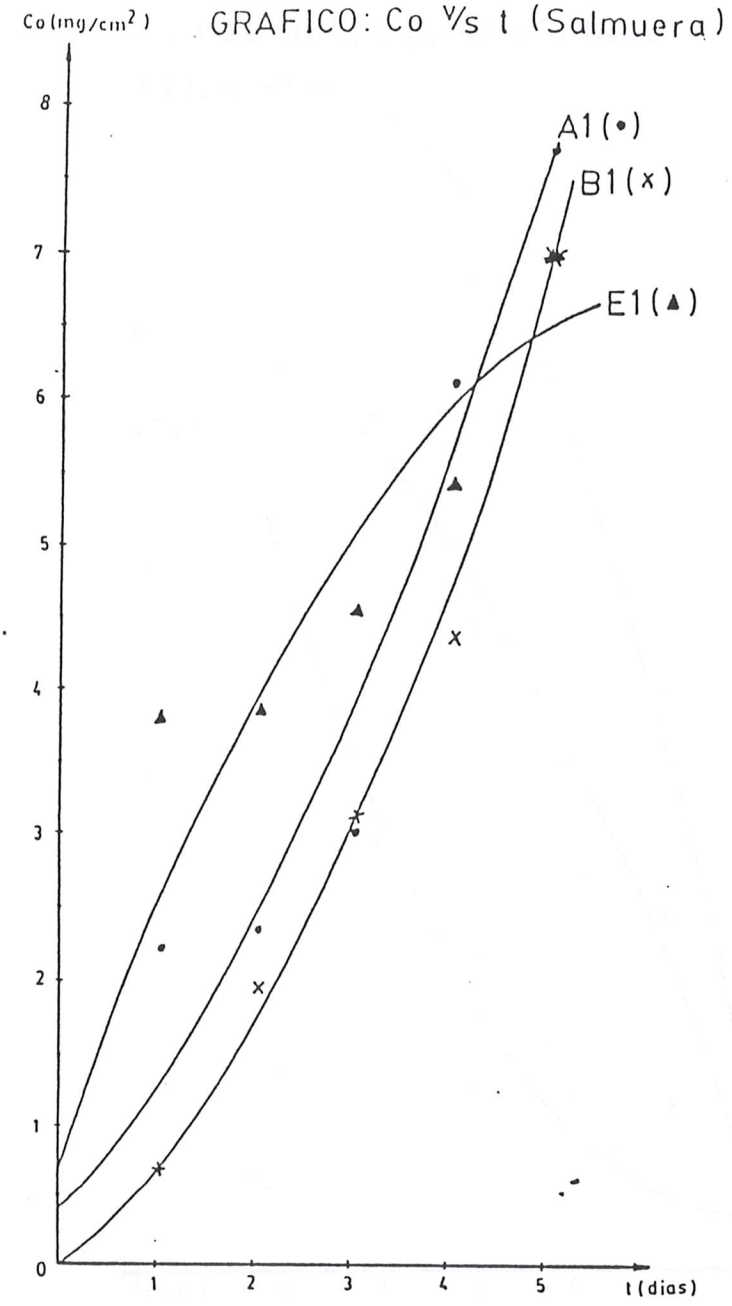


Figura 4. Corrosión vs Tiempo

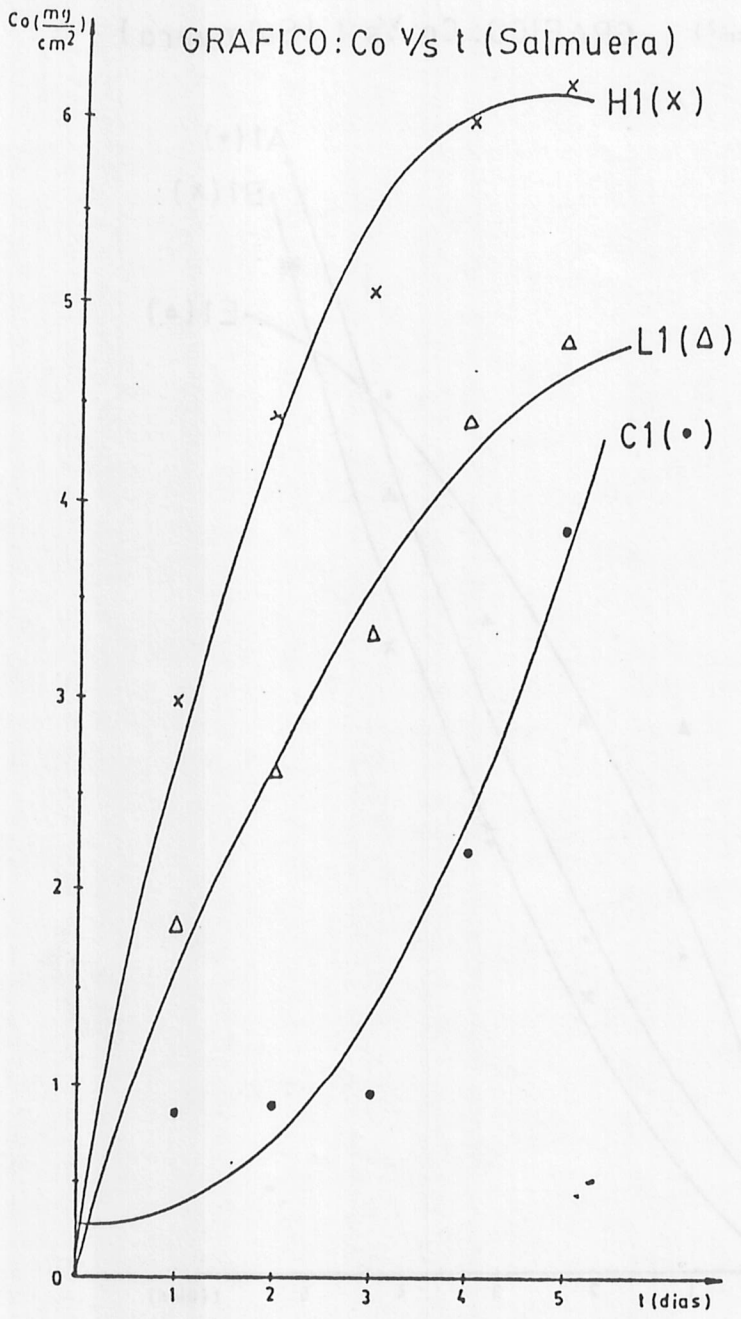


Figura 5. Corrosión vs Tiempo

4.1.- El ensayo mecánico de tracción demostró que debido a defectos inherentes al proceso de soldadura disminuyó notablemente la resistencia a la tracción de los diferentes materiales de aporte, en un rango aproximado del 20% respecto de los valores proporcionados por los fabricantes, situación que debe considerarse en la práctica para el diseño, ejecución y selección de materiales. El material de aporte con mejor comportamiento mecánico resultó ser el Tigtectig A.-

4.2.- Desde el punto de vista de la soldabilidad del acero inoxidable, es oportuno señalar el control que se debe realizar para evitar la fisuración en caliente, puesto que la cantidad de ferrita delta incidirá en mayor o menor grado sobre este fenómeno y posiblemente en los índices de corrosión.-

4.3.- Los resultados experimentales demuestran que no es necesario para las aplicaciones simuladas, utilizar el material de aporte de mayor costo en la fabricación con acero inoxidable 304, puesto que la variación de índices de corrosión entre los diferentes materiales de aporte no es tan significativa. Los mejores resultaron ser Hilarius 316 L seguido del Xuper 680CGS, observandose en el mercado que el primero tiene mucho menor precio.-

4.4.- La presencia de ferrita delta en las microestructuras de las uniones soldadas, confirma para los materiales de aporte con mejores resultados, una influencia beneficiosa en la conformación en frío, para evitar la fisuración en caliente y mejorar la resistencia mecánica. La morfología de la ferrita delta, es característica del sistema de soldadura utilizado y del gas argon como medio protector, presentándose una estructura bifásica integrada por ferrita delta y austenita, observándose por scanning en el centro del cordon de soldadura una estructura dendrítica en distintas direcciones preferentes.-

4.5.- Los medios eficaces para la prevención de la corrosión intergranular siguen siendo un tratamiento térmico de solubilización, reduciendo el contenido de carbono de los aceros inoxidables y o la presencia de elementos estabilizadores en los materiales de aporte como son Ti o Nb. El control de estas variables, más los ensayos de corrosión adecuados de inmersión y electroquímicos permitirán lograr antecedentes del comportamiento mecánico y de corrosión, para las diversas aplicaciones de ingeniería, intentando para cada realidad superar los problemas tecnológicos prácticos implícitos en la fabricación de artefactos, que están sujetos a medios agresivos limitando la vida útil y calidad de estos materiales.-

5.0.- REFERENCIAS.-

1.- Monpeau, L. Control de la Ferrita Delta en la Soldadura de Aceros Inoxidables empleando Ar + N_2 . IV Congreso Lat. de Soldadura, Buenos Aires. Anales Congreso 81, pp 1-61 (1981)

2.- Delong. W. Ferrita in Austenitic Stainless Steel Weld Met. Welding Journal, 53:273-286 (1974).-

3.- Heger, J. Mechanical Properties and Corrosion Resistance of a High-Strenght Cr-Mn-Ni Stainless Steel. ASTM, STP 369, pp 54-61 (1965).-

4.- Mars, F. and Greene N. Corrosion Engineering Ed. Mc. Graw-Hill, New York, pp 58-63 (1978).-

5.- Perry J. Manual del Ingeniero Químico 3a. Ed, USA, 2:2254 (1966).-

6.- Delattre F., Soldadura de los Aceros Inoxidables, Ed. Urmo, España, pp 53-59 (1967).-

7.- ASTM. Book of ASTM Standards, USA, 10: 5-7 (1968).-

8.- Champion F., Corrosion Testing Procedures, Chapman and Hall, Londres, Ed. Urmo, pp 468 (1970).-