



Análisis de soldadura de fundiciones "ADI", con electrodos de Fe-Ni.

Área temática:

Fundición, soldadura ADI, tratamientos térmicos, microestructuras, propiedades.

El trabajo trata sobre el análisis de los resultados de Fundiciones ADI, soldadas con electrodos consumibles que depositan una aleación de 50%Fe y 50%Ni. Se hace un estudio sobre propiedades del hierro y el níquel y las microestructuras que resultan en la aleación usada en el material de aporte, a tal fin se revisan los diagramas de fase actuales y sus predecesores. Se determinaron propiedades mecánicas de los materiales de base y el material de aporte.

Se efectuaron mediciones de microdureza en probetas preparadas especialmente para las determinaciones, tanto en el material de base, zona mezclada, y zona afectada por calor. Se vincularon los resultados de estas determinaciones con los componentes microestructurales identificados previamente.

Se caracterizaron los materiales de base y el material de aporte, para lo cual se prepararon ensayos de tracción, Charpy, HRB, y metalografía.

Las pruebas muestran las posibilidades de soldar las fundiciones ADI, con electrodos de níquel 50%, como así también las dificultades de la técnica usada y las limitaciones en los resultados obtenidos hasta el momento.

CONAMET / SAM 2008

1. Introducción

En la soldadura de fundiciones de hierro, es una práctica usada la de unir las partes, mediante el uso de electrodos con bajos, medios y altos contenidos de níquel, o directamente con Ni puro. Esta práctica se viene aplicando en fundiciones grises, nodulares y esferoidales. Los métodos más usados son, soldadura por arco, conocida por sus siglas en inglés SMAW, *shielded metal arc welding*, utilizando electrodos revestidos, *stick*, o bien con electrodos tubulares denominada FCAW, *flux cored arc welding* [1].

En esta oportunidad se analiza la micrografía y propiedades mecánicas de la soldadura en fundiciones dúctiles austemperadas, ADI, usando electro-

dos del tipo AWS ENiFe-CI con el método SMAW.

1.1. Propiedades del níquel y su afinidad con el hierro

Como se observa en la Figura 1 [2], la aleación Fe-Ni constituida por 50% de níquel e igual porcentaje en peso de hierro, se encuentra en estado líquido por encima de los 1446°C, formando una solución homogénea de ambos metales. Por debajo de la línea de Líquidus, la solución líquida solidifica en una solución sólida gamma, Sol. sól., de estructura cristalina cúbica centrada en las caras, *fcc* desordenada, donde los átomos de níquel ocupan indistintamente los lugares que en algún momento podrían ser ocupados por los átomos de hierro.

Las aleaciones Fe-Ni podrían constituir un sistema de solubilidad total en cualquier proporción que se encontraran los componentes, si no fuera por la transformación alotrópica del hierro a elevada temperatura, que pasa de estructura *fcc* a *bcc*, entre los 1395 y los 1538°C, mientras que a temperaturas de 912°C, pasa de *fcc* a *bcc*, en el eje correspondiente al hierro puro. Los componentes de este sistema de aleaciones de tipo sustitucionales, responden muy bien a las reglas de solubilidad total formuladas por William Hume - Rothery [3], metalurgista inglés (1899-1968) que realizó aportes importantes a la metalurgia física teórica y práctica. Al respecto se puede ver que, teniendo ambos elementos un radio atómico muy similar, ya que el hierro presenta 0,124 nm y el níquel 0,125nm [4], esto da una diferencia levemente superior al 4%; si en lugar

de los radios atómicos se comparan los radios iónicos de los elementos se tiene para el Fe^{+2} 0,077nm y para el Ni^{+2} 0,069nm, invirtiéndose la relación, ya que el Fe^{+2} es mayor en un 11% [5]. Sobre este particular hay alguna diferencia en los radios iónicos que, según la referencia [6] serían para el Fe^{+2} 0,087nm y para el Ni^{+2} 0,078nm, lo que lleva la diferencia a un 10% mayor para el Fe^{+2} . Por otra parte, el níquel posee red cristalina *fcc* y el hierro también entre los 912°C y 1395°C, siendo la electronegatividad del Ni 1,8 algo superior al Fe, que es de 1,7 en una escala donde el más electropositivo es cero, "0" y el más electronegativo es 4,1 [4]. Por su parte, ambos metales poseen estados de oxidación 2 y 3. Además las densidades de ambos metales son similares, presentando el Ni 8,902 Mg/m³ y el Fe algo menos, 7,874 Mg/m³ [7]. Esta última semejanza hace que las escalas de composición en porcentajes referidos a número de átomos del diagrama binario de equilibrio termodinámico de fases sea muy similar a la escala en peso del mismo. También hay similitud en los puntos de fusión de los metales siendo el del hierro de 1538°C y el del níquel de 1455°C, dando una diferencia entre ambos de 83°C. Otra similitud notable la constituye la poca diferencia entre los calores específicos, *C_p*, que es en el Fe de 448 Joule/kg.°K siendo el del níquel 440 Joule/kg.°K.

También sus calores específicos de fusión son parecidos, siendo el del hierro de 14,90 kJ/mol y el del níquel 17,57 kJ/mol [7].

1.2. Evolución del estudio de los diagramas Fe-Ni y su aplicación a la aleación 50/50

En la Figura 1, se analiza la solución sólida 50/50, Fe-Ni, usando el diagrama Fe-Ni de Goldstein [2], donde se aprecia que la línea de Líquidus, casi no tiene diferencia con la de Solidus, lo que limita el rango de temperaturas líquido - sólido a unos pocos grados, pasando de una solución líquida a una sólida, prácticamente a temperatura constante.

Toda vez que la aleación está completamente solidificada, aproximadamente a 1445°C y hasta que la aleación comienza la transformación eutectoide a 347°C, se mantiene como una solución sólida gamma (Fe, Ni). Hasta aquí resulta útil el diagrama de la Figura 1, pero debajo de los 400°C, no tenemos información sobre las transformaciones al estado sólido.

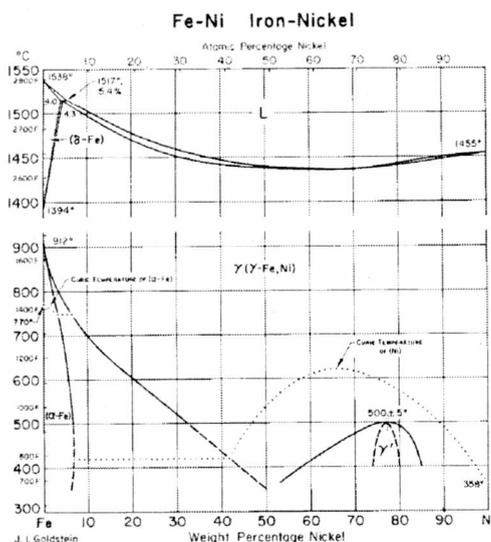


Figura 1: Diagrama Fe-Ni, realizado por J. I. Goldstein.

Para proseguir el análisis, es útil un diagrama más actualizado que el de

Goldstein, que data de una fecha anterior a 1973.

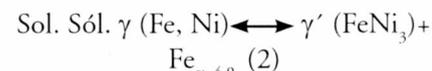
Como se ve en la Figura 2, que muestra el diagrama Fe-Ni de equilibrio termodinámico de fases, elaborado por L. J. Swartzendruber y colaboradores [8], a 347°C tiene lugar la transformación eutectoide, cuya fórmula general se recuerda en la ecuación (1).

Reacción eutectoide, fórmula general:



El sólido A es la solución sólida γ (Fe, Ni) que se transforma isotérmicamente en el Sólido B, que para el caso es la solución sólida ordenada γ' ($FeNi_3$) y el Sólido C que lo constituye la solución sólida $Fe_{\alpha 4,9}$ es decir, la máxima solubilidad de Ni en Fe_{α} .

En la ecuación (2), se tienen los reactivos y los microconstituyentes de la reacción eutectoide del diagrama Fe-Ni.



El eutectoide está constituido a 347°C por un 76,31% de γ' ($FeNi_3$) y un 23,69% de $Fe_{\alpha 4,9}$. Estos porcentajes se modifican según las líneas de Solvus de Fe_{α} y γ' ($FeNi_3$).

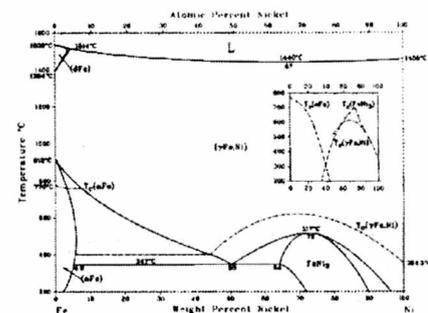


Figura 2: Diagrama Fe - Ni, según L. J. Swartzendruber, V. P. Itkin, y C. V. Alcock, 1992.

Además de los diagramas Fe-Ni, se debe tener en cuenta la presencia de una importante cantidad de carbono que viene incorporada al revestimiento del electrodo. En la Figura 3, se ve el diagrama C-Ni, preparado por Donald T. Hawkins [9], mostrando la máxima solubilidad de C, 0,55 en Ni puro y el eutéctico $(Ni)_{0,55}+C_{1,97\%}$. El diagrama C-Ni ha sido corregido por M. F. Singleton y P. Nash en 1991 [10], pero se prefiere trabajar con el de Donald T. Hawkins por no existir diferencias conceptuales importantes para nuestro análisis.

El carbono se encuentra en solución sólida intersticial en la ferrita α y en la solución sólida ordenada γ' ($FeNi_3$).

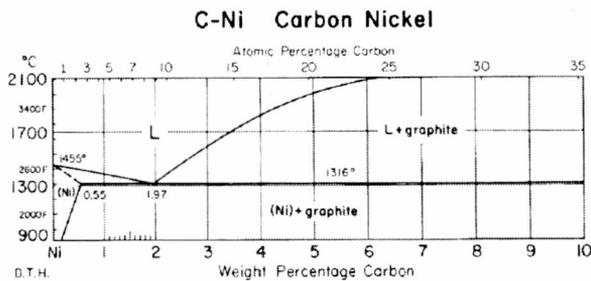


Figura 3: Diagrama C-Ni según D. T. Hawkins, mostrando la máxima solubilidad, 0,55 de C en Ni puro y el eutéctico $(Ni)+C_{1,97\%}$.

2. Desarrollo Experimental

2.1. Material de aporte de soldadura

Para la realización de las experiencias se usaron electrodos comerciales Conarco Ni55 de 4 mm de diámetro, que responden a la norma ANSI/AWS A5.15-90, ENiFe-CI [1].

Tabla I: Composición química del material de aporte ENiFe-CI

Elemento	ANSI/AWS A5.15-90	Fabricante	Muestra
C	2.0 max	1.55	1,30
Mn	2.5 max	-	1,80
Si	4.0 max	-	3,50
P	No Espec.	≤ 0.20	0,20
S	0.03 max	-	No Detec.
Fe	Resto	Resto	Resto
Ni	45-60	55.00	50,0
Cu	2.5 max	-	0,53
Al	1,0 max	-	No Detec.
Otros	1.0 max	-	No Detec.

La composición química clásica del material depositado se muestra en la Tabla I, constituido mayoritariamente por Fe-Ni.

Se usó una intensidad de corriente de 180 A, con una velocidad de avance de 150 a 160 mm/min y una tensión de 10/20 V.

Si bien el fabricante da las opciones de Polaridad: (+) (-) o ~ CA, se soldó con polaridad (+), inversa. En la Tabla I, se muestran los valores de composición química según norma ANSI/AWS A5.15-90, según el proveedor y los obtenidos en los ensayos de los investigadores.

2.2 Material de los cupones

Las ADI son fundiciones tratadas isotérmicamente, a temperaturas que se conocen como de austemperado [11]. La estructura de estos materiales es el resultado de la transformación que sufren las fundiciones esferoidales

perlíticas, *spheroidal graphite-SG*, al ser austenizadas alrededor de 900°C y luego sometidas a transformación isotérmica entre los 260 a 360°C, resultando una estructura denominada *ausferrita*, constituida por austenita saturada en carbono con agujas de ferrita precipitada en la transformación isotérmica [12].

2.3. Obtención del material base

El material base, Figura 5, fue seleccionado teniendo en consideración aspectos tecnológicos [9] y económicos. Los aspectos tecnológicos considerados en la elección fueron los mostrados en Tabla IIa y b, y se obtuvieron del bloque testigo mostrado en la Figura 4

Tabla IIa: Propiedades de la fundición esferoidal.

σ_{\max} [MPa]	σ_{fluencia} [MPa]	ϵ_{rotura} [%]	Charpy [J/cm ²]
820	750	7	81

Tabla IIb: Propiedades de la fundición esferoidal. Durezas

HB: 225	HV:237	HR _B : 97
---------	--------	----------------------

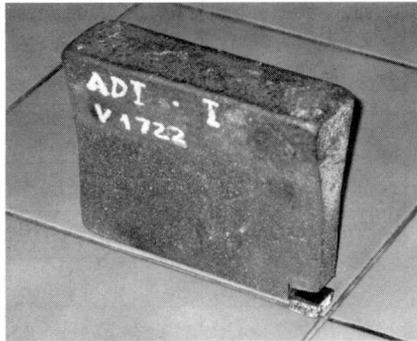


Figura 4: Fotografía del bloque testigo de la colada.

La fusión se realizó en un horno eléctrico de inducción de 3000 Hz y 50 Tn de capacidad.

El material se preparó a partir de arrabio de primera fusión y rezago clasificados de fundición de reciclados de planta. El material fue colado en moldes de arena, previamente se lo inoculó y agregó el nodulizante. Se usó un programa para el modelado del llenado de los moldes. La temperatura de nodulización fue de 1550°C y la de colado de la aleación de 1450°C. La composición del nodulizante, *Stein SPH4* fue la indicada en la Tabla III:

Tabla III. Composición química del nodulizante (% en peso).

Mg:	Ca:	Ce:	Si:	Al:
8,21	3,08	3,04	44,6	0,55

Para el moldeo se usó arena aglutinada con un máximo de 1,1% de resina fenólica, por reglamentación sanitaria. Las superficies fueron pintadas

con circonia, ZrO₂, diluida en alcohol etílico industrial y secada para colado en el día. La pintura a base de circonia, posee buena resistencia a la temperatura y mejora la terminación superficial de las piezas coladas en arena.

Tabla IV. Composición química de la fundición esferoidal original, *as cast* (% en peso).

C:	Mn:	Ni:	Cu:	P<
3,35	0,58	0,58	0,15	0,026
Si:	Cr:	Mo:	Mg:	S<
2,66	0,30	0,03	0,04	0,015

El carbono equivalente-CE- se calcula como:

$$CE=C+1/3 Si= 3,35+1/3 \times 2,66= 4,23 \text{ (3)}$$

Pero a los fines del cálculo del CE y su influencia en la aparición de grietas, es conveniente usar una fórmula que contemple otros elementos que integran la aleación:

$$CE=C+0,31Si+0,33P+0,45S-0,028Mn+Mo+Cr-0,02Ni-0.01Cu \text{ (4)}$$

$$CE=3,35+0,8246+0,0086 +0,007-0,0162+0,031 +0,25-0,0116-0,0038= 4.4396 \text{ (5)}$$

Elevado contenido de C en las fundiciones, tanto el grafitico como el contenido en la matriz, es un factor que dificulta la soldabilidad de estos materiales. En la bibliografía específica se presentan comparaciones sobre el tema, como así también gráficos carbono vs. silicio, donde se aprecia la ubicación de los aceros al carbono y las fundiciones. Cabe aclarar, que dentro de los aceros, los más aptos

para la soldadura son aquellos donde el carbono equivalente es el menor posible. Si bien con la aplicación de procedimientos adecuados se pueden soldar aceros de mayor porcentaje de carbono, podemos tomar un límite para el carbono equivalente del 0,35 al 0,40%, lo que es unas diez veces menor que el carbono equivalente de las fundiciones en análisis, de CE 4,44%. Lo expresado da cuenta de las dificultades que impone la soldadura de estos materiales.

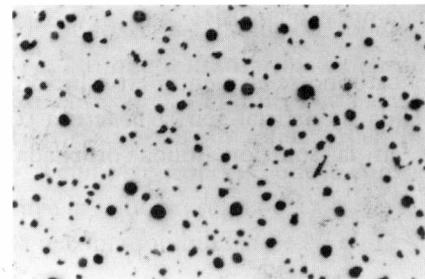


Figura 5: Fotomicrografía sin ataque de la estructura de fundición esferoidal del bloque testigo de la colada, x100.

2.4. Tratamiento térmico de austemperado

Se realizaron las estimaciones y prepararon los parámetros térmicos para obtener una fundición ADI, Grado II, según la norma ASTM: A 896-90, *Standard Specification for Austempered Ductile Iron* [12].

El TT se diseñó, teniendo en cuenta:

Resistencia (σ_{max}): 865 Mp;

HB: 269 a 363; Hv: 283 a 382 Kg/mm²;

Tensión de fluencia ($\sigma_{0,2}$): 550 a 690 Mp.

BIBLIOTECA CENTRAL
II. de M. M.

Se austenizó a 920°C y se austemperó a 370°C durante 90 minutos. Se obtuvieron valores dentro de los estimados [11].

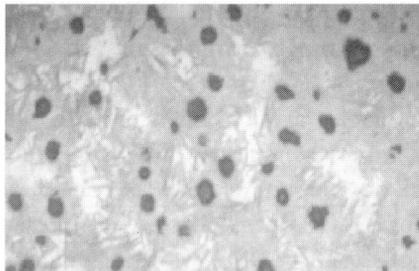


Figura 6: Fotomicrografía óptica de fundición ADI del bloque testigo de la colada. Ataque nital 2; 5 segundos, $\times 100$.

2.5. Preparación de la junta para soldar los cupones.

La soldadura se efectuó sobre placas de fundición ADI de 15 mm de espesor, 70 mm de ancho y 200 mm de largo. Previo a la operación de soldadura se prepararon los lados a unir [13], realizando sobre uno de ellos un bisel a 45°, para facilitar la llegada del electrodo hasta el fondo de la unión de ambas partes. La otra placa, mitad del cupón mantuvo su borde con el ángulo original a 90°, para permitir colocar una termocupla tipo "S", que registrara la temperatura muy cerca de la pileta líquida de metal fundido.

En la Figura 7, se tiene un detalle de la junta para soldadura.

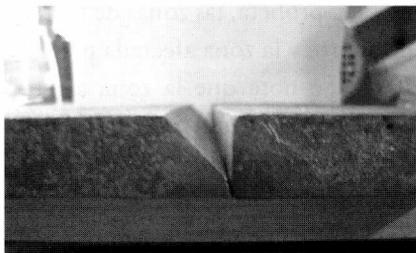


Figura 7: Vista de perfil de placas, mostrando el tipo de junta usado.

En la Figura 8, se muestra la inserción de la termocupla en el orificio de la placa a soldar, mientras que en las Figuras 9 y 10 se muestra el dispositivo electrónico preparado para la toma de temperatura durante la soldadura.



Figura 8: Fotografía de detalle mostrando la inserción de una termocupla en una de las partes del cupón a soldar.

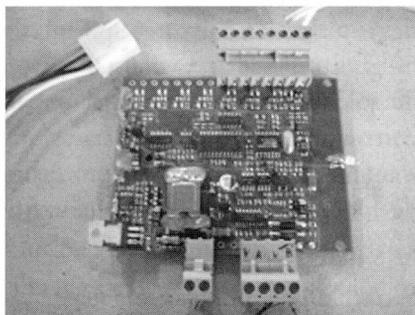


Figura 9: Fotografía de la placa electrónica de interfase.

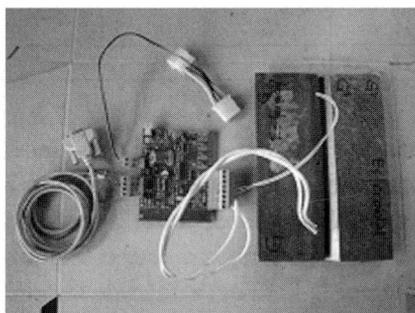


Figura 10: Fotografía del conjunto completo, preparado para conectar a una PC.

2.6. Soldadura de los cupones

La selección del consumible de soldadura se realizó teniendo en cuenta que las fundiciones son materiales ferrosos con alto contenido de Si y C, como ya se comentó en nuestro caso, el carbono equivalente es de 4,44% y teniendo en consideración lo analizado en la introducción de este trabajo, hay una buena compatibilidad entre Fe, Ni, C y otros elementos presentes en cantidades importantes como el Si y el Mn. En la sección 2.1, se pueden ver los detalles de los parámetros y características de la soldadura.

En las Figuras 11a y b se pueden ver los gráficos de las temperaturas alcanzadas durante la primera y segunda pasada de soldadura, nótese en la Figura 11a que la trepada de la temperatura se inicia en aproximadamente 24°C y alcanza un pico de 300°C, mientras que en la Figura 11b, se inicia en 100°C y llega a los 600°C. Estos datos se obtuvieron con el dispositivo mostrado en las Figuras 8, 9 y 10. Estas temperaturas modifican la microestructura de la fundición ADI en la zona afectada por calor-ZAC.

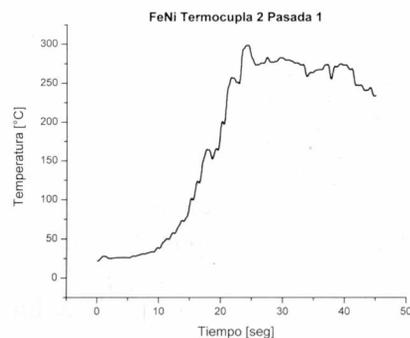


Figura 11a: Gráfico del primer cordón de soldadura.

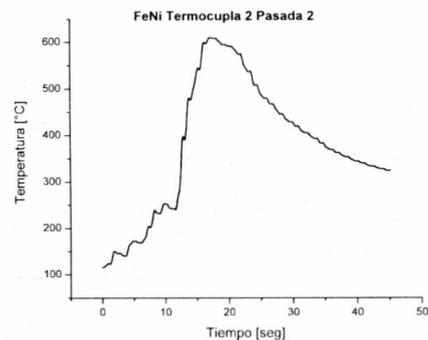


Figura 11b: Gráfico del segundo cordón de soldadura.

2.7. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas con electrodos 50/50 FeNi

De los cupones soldados se cortaron, mediante la técnica de corte por agua a presión con polvos abrasivos en suspensión, muestras en sentido transversal al cordón de soldadura, obteniéndose probetas para los ensayos de tracción, Charpy y metalografía.

2.7.1. Propiedades mecánicas. Ensayo de Tracción

Tabla V:
Propiedades mecánicas del ensayo de tracción de probetas soldadas.

Probeta	$\sigma_{0,2}$ [MPa]	σ_{max} [MPa]	ξ [%]	Charpy [J/cm ²]
1FeNi AS	543	654	5	120
2FeNi AS	615	685	6	80
3FeNi AS	624	694	6	110
4FeNi AS	775	861	4	60

En la Tabla V se indican los valores del ensayo de tracción, de probetas obtenidas de los cupones soldados.

2.7.2. Propiedades mecánicas. Ensayo Charpy

En Tabla VI se indican los valores de los ensayos Charpy, de probetas sin entalla, obtenidas de los cupones soldados.

Tabla VI: Propiedades mecánicas del ensayo Charpy s/ entalla, de probetas soldadas.

Probeta	I) FeNi AS	II) FeNi AS	III) FeNi AS	IV) FeNi AS
Charpy [J/cm ²]	120	80	110	60

2.7.3. Propiedades mecánicas. Perfil de dureza Vickers de probetas soldadas con electrodos 50/50 FeNi

En la Figura 12, se puede ver el perfil de dureza que se tomó abarcando el material de aporte de la soldadura, la ZAC y el material base. Las mediciones se realizaron con carga aplicada de 50 gf. En el gráfico, se tiene el cordón de soldadura, que aparece al centro con valores de dureza más bajos que a ambos lados, siendo su promedio de Hv 240. También se puede no-

grafito, con zonas de ferrita, menos de Hv 150, mientras que las durezas más elevadas son las de los carburos o zonas con alta densidad de estos compuestos, que llegan a sobrepasar los Hv 750.

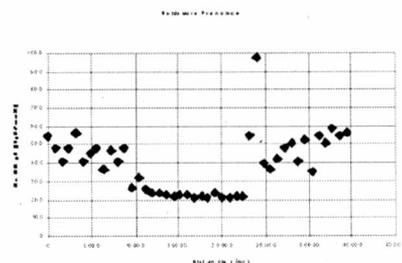


Figura 12: Gráfico de perfil de dureza Vickers, Hv, de la soldadura de cupones ADI. Carga: 50 gf.

También se presentan valores intermedios que pueden corresponder a lagunas de austenita saturada en carbono que no se ha transformado, constituyendo la ausferrita misma, que es la matriz de estos materiales. En promedio se estima un valor de Hv 475.

tar que el material de la soldadura es más uniforme en sus valores mientras que el material de base, ADI presenta valores más erráticos, esto es explicable por la heterogeneidad de la composición de las fundiciones donde podemos tener fases y microconstituyentes de muy diferentes propiedades, correspondiendo los puntos más blandos a esferoides o nódulos de

En la Figura 13, se muestran probetas de ADI soldadas con electrodos de diferente tipos, a saber: en la parte superior con un electrodo de base hierro con bajo hidrógeno, en la parte media con un electrodo de níquel puro y en la parte inferior con el electrodo ENiFe-Cl de FeNi 50/50. Se destacan en la parte central de cada probeta, las zonas de material de aporte y la zona afectada por calor ZAC. Se nota que la zona afectada por calor de cada probeta es diferente, no sólo en la apariencia más o menos oscura que puede deberse al tiempo de ataque químico utilizado, sino fundamentalmente a la extensión, esto es producto de la cantidad de calor aportado en cada caso para

realizar la unión por soldadura. Si bien en todos los casos se trató de realizar la unión con la menor cantidad de calor posible (J/m). Las diferentes calidades de electrodos necesitan ser soldadas con parámetros particulares como son, la tensión (V), la intensidad de corriente (I) y la velocidad de avance (Va) entendida como la velocidad de desplazamiento de la varilla o electrodo (m/seg.). Estos parámetros pueden ser vinculados con la cantidad de energía que recibe el material base durante la soldadura [15], mediante la fórmula (6)

$$Q = V \cdot I \cdot 60 / Va \quad (6)$$

Como puede observarse en la Figura 13, la probeta inferior, soldada con electrodos FeNi 50/50, es la que presenta el menor aporte de calor, lo que se nota observando la ZAC, que es muy reducida.



Figura 13: Probetas metalográficas de ADI, soldadas con diferentes electrodos y energía.

2.8. Micrografía y fractografía

Si bien las probetas preparadas para observación metalográfica, evidencian que se produjeron modificaciones microestructurales en un rango extendido de la zona de unión,

el hecho experimental demuestra que las roturas por tracción y péndulo Charpy, indican que la parte más débil es el material de aporte y la zona de mezcla, por lo que el análisis estará concentrado en estos sitios, aunque el material de base de la ZAC también sufrió cambios. También la determinación del perfil de dureza corrobora que la zona más blanda es la del material de aporte y la zona de mezcla. Estas zonas corresponden a las aleaciones 50/50 y 90/10 FeNi. Si se observa el diagrama FeNi de la Figura 2, se podrá notar que la primer aleación, 50/50 corresponde a la reacción eutectoide del sistema, mientras que la segunda 90/10 se encuentra en la región de las hipoeutectoides, ricas en hierro. Cabe aclarar que dicha reacción eutectoide no tiene lugar debido a la cinética de la reacción que ocurre con una alta tasa de enfriamiento vs. tiempo, impidiendo la difusión de los componentes sustitucionales hasta las posiciones de equilibrio de las fases. En conclusión, la fase que aparece es la de alta temperatura, que es una solución sólida gamma desordenada FeNi, contorneada por el carbono eutéctico proveniente del revestimiento del electrodo.

2.8.1. Micrografía

En la Figura 14 se muestra la micrografía de la zona de mezcla, donde se ha indicado con **A** el material de aporte puro FeNi 50/50, con **B** el material base, ADI y con **C** la zona de mezcla ADI+ Material de aporte puro FeNi.

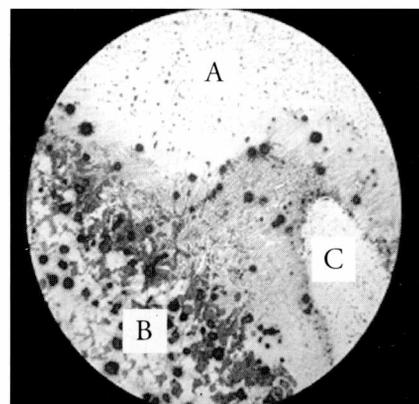


Figura 14: Micrografía óptica de la zona de mezcla.

En las Figuras 15 y 16 se muestra el aspecto dendrítico del material de aporte. En la Figura 19, que muestra la fractografía de microscopio electrónico de barrido ambiental-ESEM, x450, de la rotura a través de esta estructura, se nota que cuando es intergranular, bordea las dendritas y su aspecto es negro.

En las Figuras 17 y 18, se muestran las micrografías ópticas y de microscopio electrónico de barrido ambiental-ESEM, respectivamente, donde se aprecia, además del material de aporte, la influencia del material de base. En la Figura 17, se observan las dendritas de la Ledeburita transformada y una mezcla de carburos



Figura 15: Micrografía óptica con efecto Nomarsky de la zona de aporte puro, FeNi 50/50. Nital 2, 15 segundos. x200, ampliado 2 veces.

primarios y material de aporte que se vé ampliada en la Figura 18. Este material compuesto, resulta de buenas propiedades mecánicas cuando la rotura ocurre a través de él en los ensayos de tracción o Charpy.

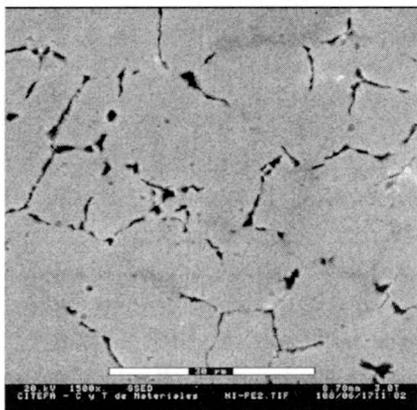


Figura 16: Microscopio ESEM. Zona de aporte puro, FeNi 50/50. Nital 2, 15 segundos, x1500.

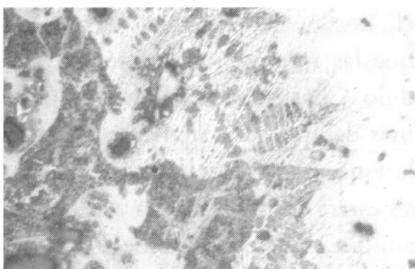


Figura 17: Micrografía óptica de la zona de mezcla, ADI+FeNi 50/50. Nital 2, 15 segundos, x200.

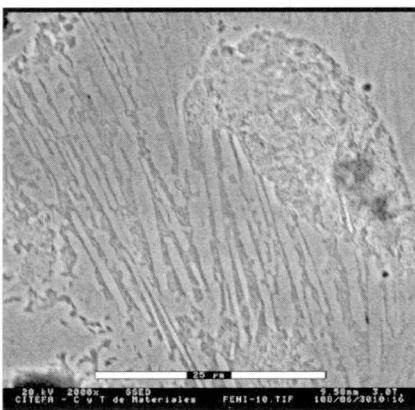


Figura 18: Microscopio ESEM. Zona de ADI+FeNi 50/50. Nital 2, 15 segundos, x2000.

2.8.2. Fractografía

En la Figura 19, se muestra las fractografía de la rotura intergranular cuando la misma se produce a través del borde dendrítico. Este tipo de fractura presenta poca ductilidad, aunque es posible distinguir indicios de mecanismos de deformación plástica.

En la Figura 20, se presenta la fractografía de la superficie de rotura cuando la misma tiene lugar en la región mezclada ADI+material de aporte FeNi 50/50. Como se expresó anteriormente este tipo de fractura posee mayor resiliencia en el ensayo Charpy y mayor resistencia en las pruebas de tracción. Este último tipo de fractura se presenta en color metálico claro, cuando se lo observa a ojo desnudo, mientras que la rotura interdendrítica de la Figura 19 aparece a simple vista, con un elevado color oscuro.

fusión con el material base y entre pasadas. De todos modos, luego de algunas prácticas, las soldaduras se realizaron en condiciones satisfactorias.

La necesidad de tener un soldador experto y aún así tener que realizar varios cordones de práctica no es una cuestión menor, ya que se trata de electrodos de alto precio, fundamentalmente por el contenido de Ni y por fabricarse menos masivamente que otros consumibles, lo que baja la ventaja de escala. Se trata de un electrodo especial, lo que lo convierte en un material caro.

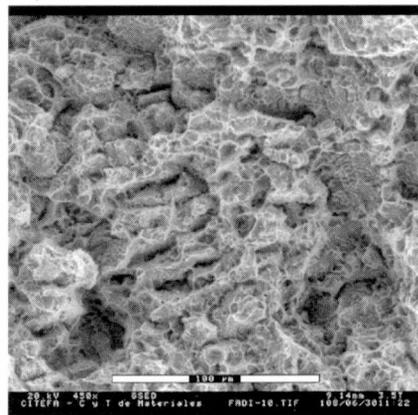


Figura 19: Microscopio ESEM. Fractura intergranular en la zona de aporte puro, FeNi 50/50, x450.

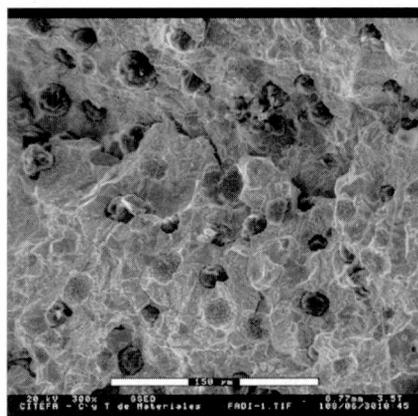


Figura 20: Microscopio ESEM. Fractura intergranular en la zona de aporte puro, FeNi 50/50. Nital 2, 15 segundos, x1500.

3. Comentario

Durante la ejecución de las soldaduras de cupones de ADI, se pudo verificar que hay cierta dificultad para elevar la temperatura, tornándose color rojo cereza. Al bajar la intensidad de corriente para evitar el efecto antedicho, se notaba la dificultad para lograr una penetración satisfactoria, que traía como consecuencia la falta de unión en zonas que resultaban de bajas propiedades mecánicas como la resiliencia en el Charpy, falta de alargamiento en tracción o caída de las tensiones de fluencia y de rotura.

En ocasiones se produjeron macrodefectos, fundamentalmente falta de

3.1 Resultados y discusión

Como ya se comentó, la soldadura de fundiciones austemperadas, ADI, se pueden soldar a temperatura ambiente, usando el método SMAW, con electrodos ENiFe-CI, que depositan una aleación 50/50 FeNi.

Las dificultades operativas son mayores que en otros casos de soldadura de ADI, como por ejemplo, aporte de níquel puro o aplicación de aleaciones base hierro con bajo contenido de hidrógeno.

La presencia de macrodefectos es más frecuente que en las soldaduras antedichas. Aún así, se logra una unión de características aceptables y todavía con mejores valores de Charpy y Resistencia, que en los ejemplos nombrados. De todos modos, la posibilidad de encontrar defectos hace que se deba aumentar los controles de calidad de las piezas soldadas, elevando los costos de operación y de retrabajos.

4. Conclusiones

1. Las ADI, son soldables a temperatura ambiente, 22°C, con electrodos consumibles de tipo ANSI/AWS ENiFe-CI de 50/50 FeNi.

2. La unión soldada se logra con algunas dificultades operativas para su ejecución, presentando en zonas macrodefectos que pueden ser reparados haciendo una remoción de material de la zona y vueltos a soldar adecuadamente.

3. La resistencia y límite de fluencia es inferior al de la fundición ADI, lo mismo sucede con la dureza que alcanza entre el 60 y 70 % del material base, ADI.

4. Los valores de Charpy en probetas sin entalla están en el orden del 70 % del material base.

5. Referencias

1. G. GARLOUGH and T. STOCKER, Welding in Ductile Iron. AFS, *American Foundrymen's Society*, Des Plaines, Illinois, USA, 1999, 252-259.

2. J. I. GOLDSTEIN, Fe-Ni diagram, Metal Handbook Vol.8, 8th edition, metallography, structures and phase diagrams. ASM, Metals Park, Ohio, USA 1973 pag. 304.

3. JAMES F. SHACKELFORD, Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros, 6^a edición, Pearson-Prentice Hall, Pearson Educación S.A. Madrid, Rivera del Loria 28, Madrid, 2006, 114-115.

4. J. J. M. BARRAGÁN, Tecnología e Ingeniería de Materiales. Mc. Graw Hill Interamericana, México, 2004, pag. 9-11.

5. RAYMOND CHANG, Química, 4ta. Edición Mc. Graw Hill Interamericana, México 1992, pag. 319.

6. JAMES F. SHACKELFORD, Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros, 6^a edición, Pearson-Prentice Hall, Pearson Educación S.A. Madrid, Rivera del Loria 28, Madrid, 2006, pag.759.

7. A. ROLANDO y M. R. JELLINEK, Tabla Periódica de los Elementos, 1992, A-Z editora, Bs. As.

8. L. J. SWARTZENDRUBER, V.P. Itkin, and C.V. Alcock, Fe-Ni diagram, ASM Handbook, ASM, Metals Park, Ohio, USA 1992, pag 845.

9. DONALD T. HAWKINS, C-Ni diagram, Metal Handbook Vol.8, 8th edition, metallography, structures and phase diagrams. ASM, Metals Park, Ohio, USA, 1973, pag. 274.

10. M. F. SINGLETON and P. NASH, C-Ni diagram, ASM Handbook

Vol.3, ASM, Metals Park, Ohio, USA, 1991, pag. 533.

11. F. R. AGÜERA, ANSALDI, REYNOSO, FIERRO, ALVAREZ VILLAR y AYLLÓN, "Experiencias de Soldadura de ADI - Austempered Ductile Iron- con Electrodos Básicos Base Hierro de Bajo Contenido de Hidrógeno y Mínimo Aporte Calórico". Anales CONAMET/ SAM, Sexto Congreso de Metalurgia, Santiago de Chile, 2006.

12. ASTM 897 M-90, Standard Specifications for Austempered Ductile Iron Casting.

13. ROGER A. BUSHEY, ASM Metal Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing, and Soldering "Guide for Welding Iron Casting" ANSI/AWS, ASM International, 1993, pag. 1755.

14. ASM Specialty Handbook, Cast Iron, Editor J.R. Davis 1st edition, ASM International, Ohio, 1996, 215-243.

15. J. A. PALMA y R. TIMERMAN, Ciencia y Técnica de la Soldadura, Tomo I, Ediciones Conarco, Murature 791, Villa Lynch, Pcia. De Bs. As., Argentina, 1983, pag. 13-14.

6. Agradecimientos

A las autoridades de la Universidad de la Marina Mercante-UdeMM y el Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa - CITEFA, que sostienen el proyecto SOLADI. Al Tec. Dante Giménez, por los trabajos en el microscopio de barrido SEM y la microsonda EDAX. A la Tec. Myrian Giordano y Srita. Elizabet Giordano por su aporte en el microscopios electrónico de barrido ambiental, ESEM.