

## SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO AISI 321H

PEDRO PABLO TORRES MEDINA

Departamento de Diseño Mecánico,  
Materiales y Procesos

Facultad de Ingeniería

Universidad Francisco de Paula Santander

El presente trabajo consiste en soldar acero inoxidable AISI 321H aplicando especificaciones técnicas según normas de soldadura, conocer las propiedades y fenómenos que ocurren en el metal base y seleccionar el material de aporte apropiado para asegurar la buena calidad del proceso.

### 1. FUNDAMENTACIÓN BÁSICA

El acero inoxidable AISI 321H pertenece al grado austenítico y para soldarlo se tienen en cuenta las propiedades mecánicas y las características químicas que afectan la resistencia a la corrosión. Al elegir el proceso de soldadura, está condicionado a reacciones posibles de cromo con el oxígeno y el carbono a las temperaturas del proceso.

Los aceros inoxidables austeníticos tienen un alto coeficiente de expansión térmica, sobre un 50% más alto que los aceros al carbono o de aleación de la serie 400, el cual requiere sumo cuidado para disminuir la distorsión y las deformaciones de las partes soldadas.<sup>(1)</sup>

Las temperaturas de fusión de los aceros inoxidables austeníticos al cromo-níquel son ligeramente menores que la de los aceros al carbono, por lo tanto a este material es necesario aplicarle menor cantidad de calor que a los aceros al carbono.

La conductibilidad térmica de los aceros inoxidables austeníticos es el 40% menor que la de los aceros al carbono; esto significa que retienen el calor más tiempo. El efecto de la concentración del calor conjuntamente con el coeficiente de dilatación más grande que los aceros al carbono, conlleva a deformaciones y tensiones residuales elevadas en la unión soldada.

### 2. PROBLEMAS EN LA SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS AL CROMO- NIQUEL.

#### 2.1 TENDENCIA AL AGRIETAMIENTO

La tendencia al agrietamiento de la zona fundida y de la zona de influencia térmica en los aceros inoxidables austeníticos al cromo-níquel, ha sido objeto de estudio por varios investigadores, quienes plantean que la razón de las grietas en caliente se debe a la formación de una película de silicatos alrededor de los granos de austenita.

Se ha comprobado que la presencia de una pequeña cantidad de delta ferrita ( $\delta$ ) en la estructura del metal, capaz de precipitar alrededor del grano de austenita, evita la presencia de los silicatos, es decir, que con una estructura compuesta por austenita mas ferrita, se evita la tendencia al agrietamiento de estos aceros. Se plantea que con 2 a 5% de delta ferrita ( $\delta$ ) es suficiente para evitar el agrietamiento, por lo tanto el metal de aporte debe garantizar un metal depositado con estas características, para esto es necesario el empleo del diagrama de

Shaeffler, como se muestra en la figura 1.

#### 2.2 PRECIPITACIÓN DE CARBUROS DE CROMO

La corrosión intergranular de los aceros inoxidables austeníticos se basa en la precipitación de carburos de cromo en los bordes de grano de la austenita, cuando son calentados entre 420 - 870°C y enfriados lentamente a través de este rango como se muestra en la figura 2.

El carbono absorbe el cromo en las proximidades del borde del grano de austenita, formando un carburo rico en cromo y ocasiona una des-cromización local adyacente a estos carburos; si el contenido de cromo disminuye a valores menores del 12%, el cual es el límite mínimo de inoxidabilidad para estos aceros, esta zona pobre en cromo se encuentra propensa a la corrosión.

El carbono es el elemento fundamental para la formación de los carburos de cromo, por tal razón la solución es reducir su contenido por debajo del límite de solubilidad del carbono en la austenita.

La dificultad de reducir el contenido de carbono por debajo de 0.02% ha conducido a añadir a los aceros inoxidables austeníticos elementos con mayor afinidad por el carbono que el cromo, lo cual conduce a estabilizar el contenido de cromo en la estructura, estos elementos son el titanio, el niobio y el tantalio. La formación del carburo de titanio y de niobio, evitan la formación del carburo de cromo.

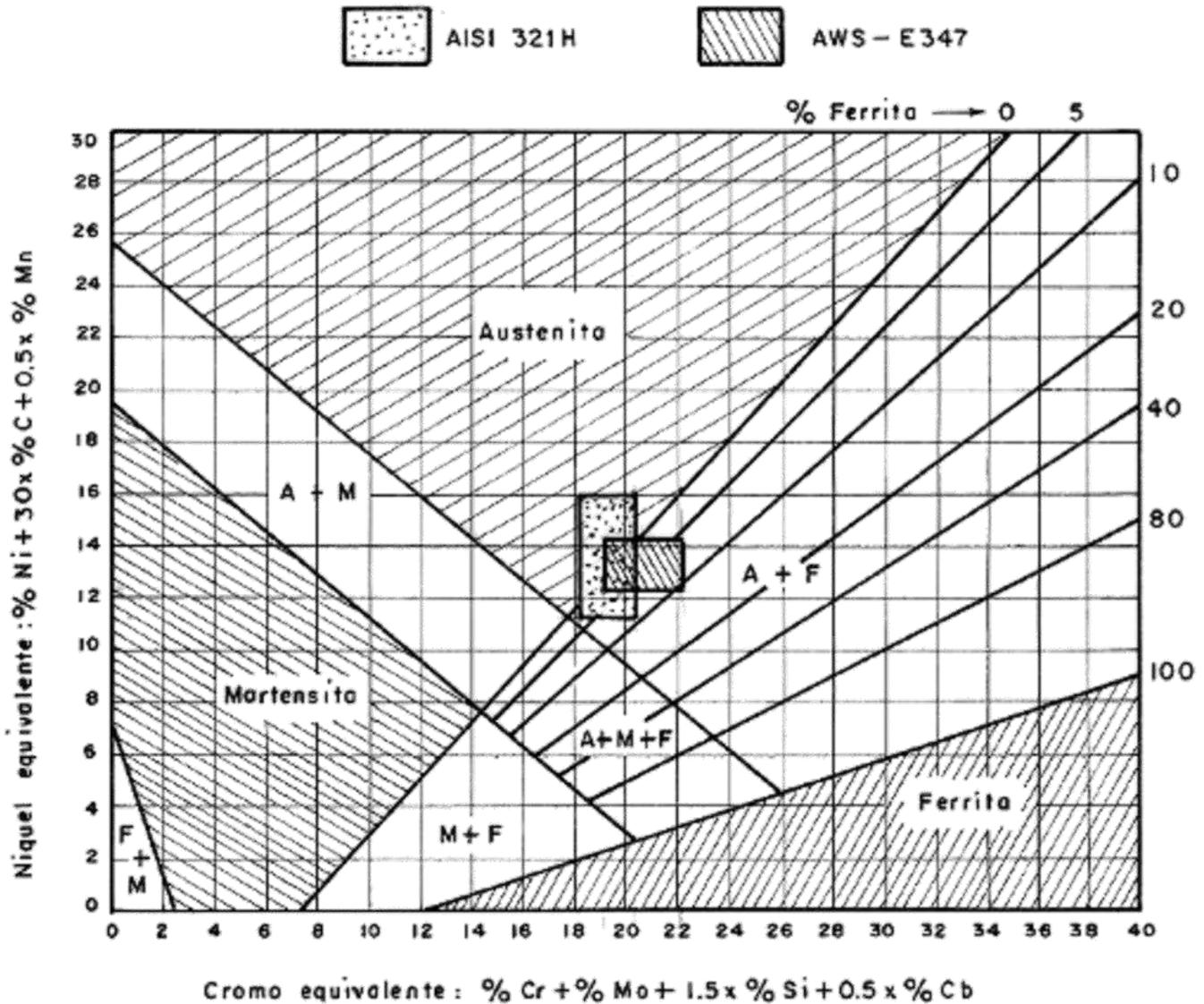


FIGURA 1. Diagrama de Schaeffler para estimar los contenidos de ferrita de depósitos soldados de los aceros inoxidables (1).

Los aceros inoxidables austeníticos calentados a temperaturas de 950-1000°C disuelven los carburos de cromo y luego con enfriamientos rápidos al aire impiden dicha precipitación.

*"El diagrama de Schaeffler permite la selección del electrodo más adecuado para soldar aceros inoxidables".*

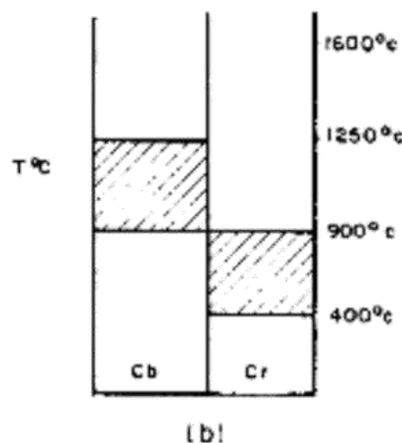
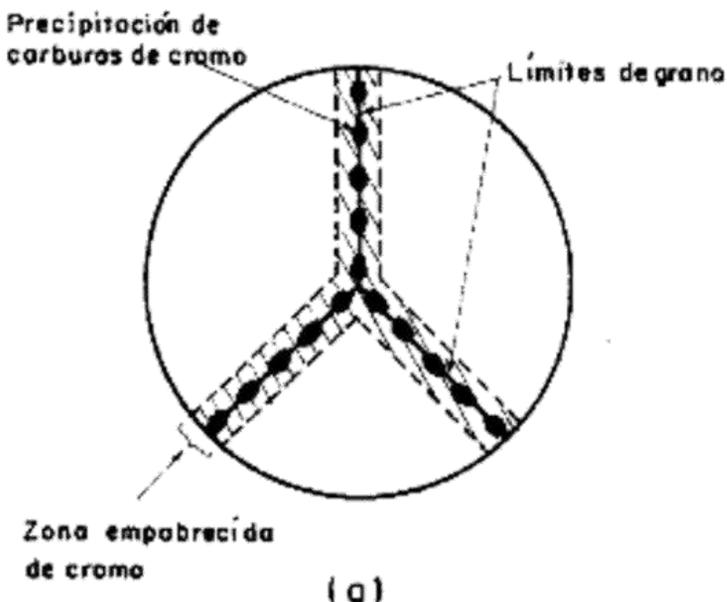


FIGURA 2. a. Diagrama representativo del límite de grano sensibilizado de un acero inoxidable tipo 304  
b. Temperaturas de precipitación de carburos de Columbium y de Cromo (3)

## 2.3 FORMACIÓN DE LA FASE INTERMETALICA SIGMA

En el diagrama hierro-cromo aparece una fase intermetálica sigma ( $\sigma$ ) para concentraciones elevadas de cromo a temperatura entre 650-900°C. Esta fase se obtiene cuando los aceros con alto contenido de cromo se calientan a temperaturas en el rango antes mencionado durante un largo período de tiempo y se debe a una transformación de la fase ferrita a fase sigma.<sup>(4)</sup>

La fase sigma ocasiona la pérdida de la resistencia al impacto, ductilidad y resistencia a la corrosión.

Para evitar la formación de esta fase se recomienda aumentar el contenido de níquel, debido a que el contenido de cromo no se puede disminuir porque se compromete la resistencia a la corrosión de los aceros; también mediante un tratamiento a temperaturas superiores a 1040°C.<sup>(5)</sup>

## 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA SOLDAR EL ACERO INOXIDABLE AISI 321H.

### 3.1 MATERIAL BASE

El material base es un acero inoxidable austenítico del grado AISI 321H en estado laminado y recocido con las siguientes características: <sup>(6)</sup>

Composición química

C	=	0.04 - 0.10%
Mn	=	2.0%
Si	=	1.0%
P	=	0.045%
S	=	0.030%
Cr	=	17 - 19%
Ni	=	9.0 - 12%
Ti	=	4X%C

Propiedades mecánicas: Resistencia a la tensión : 90.000 psi  
Resistencia a la cedencia: 35.000 psi  
Alargamiento: 45% Dureza: 217 BHN Espesor de la lámina: 7.8 mm

El cálculo de los contenidos de cromo y níquel equivalentes según fórmulas se muestran en la figura 1 y los siguientes son los valores:

Para rango inferior  
[Cr]= 18.58%  
[Ni]= 11.20%

Para rango superior  
[Cr]= 20.58%  
[Ni]= 16.0%

Al graficar en el diagrama de Shaeffler se obtiene un rectángulo indicando que la estructura del material base es de austenita más ferrita con una variación de 0 a 9%.

### 3.2 PREPARACION DEL METAL BASE

Las probetas se prepararon a tope con los bordes en V como se muestra en la figura 4. Este tipo de unión soldada tiene la ventaja sobre otras uniones porque concentra menos tensiones.

La preparación de los bordes se realizó por medios mecánicos, se limpiaron con cepillo de alambre de acero inoxidable y solventes químicos hasta una distancia de 25 mm de la línea de los bordes.

Se soldaron probetas en las posiciones 1G, 3G y 4G como se muestra en la tabla 1.

*"La soldadura se efectúa con material de aporte cuya composición química debe ser aproximada a la del metal base pero con contenidos de ferrita del 5 al 10% para evitar la tendencia al agrietamiento"*

TABLA 1. PROBETAS PARA ENSAYOS

POSICIÓN	DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE SOLDADURA	No. PROBETA
1G	Chapas horizontales Soldadura plana	Plana a derechas	4
3G	Chapas verticales soldadura vertical descendente	Vertical descendente	4
4G	Chapas horizontales Soldadura bajo techo	Sobre cabeza a derechas	4
Metal base	Chapa de 7.8 mm de espesor	Sin soldar	1

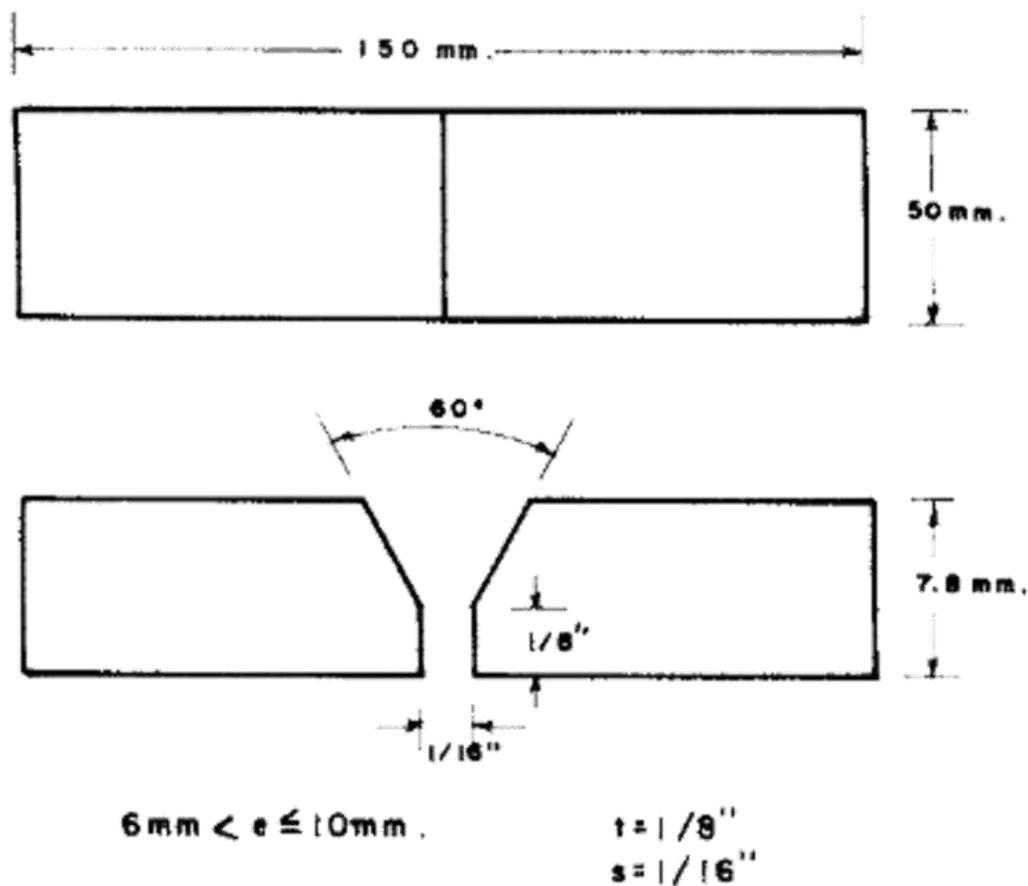


FIGURA 4. Preparación de los bordes

### 3.3 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Para el pase de raíz se utilizó el proceso GTAW (TIG) protegido con gas argón y como electrodo una varilla desnuda de Inconel 182 como material de aporte.

Las características del electrodo son:

Ni = 61%	Resistencia a tensión = 85.000 psi
Cr = 26%	Resistencia a la cedencia = 35.000 psi
Fe = 11%	Dureza = 150 BHN
Otros = 2%	Elongación = 45%
	Diámetro = 3/32 pulgada

Este electrodo es útil por su bajo aporte de calor y presenta depósitos con mayor resistencia a la corrosión intergranular y transgranular; posee gran penetración y alta miscibilidad entre el metal base y el charco fundido.

El inconel tiene gran resistencia a la oxidación de agentes químicos y un número normalizado de ferrita de 7 FN para evitar el agrietamiento en caliente.

Para realizar el pase de raíz se seleccionaron los siguientes parámetros:

Intensidad = 70 Amperios  
 Potencial = 16 voltios Corriente directa polaridad invertida (CDPI)  
 Velocidad de soldeo: 12.5 mm/min  
 No se requiere precalentamiento del metal base ni tratamiento térmico de recocido de la soldadura.  
 La raíz está formada de un solo cordón.  
 Máquina de soldar = Miller modelo XMT 300 cc/cv.

Con el fin de lograr una buena distribución del calor, el pase de raíz debe aplicarse lenta y uniformemente. La energía bruta aplicada (EBA) que es la energía de aportación "heat input" se calcula según la relación (6):

$$EBA = \frac{70A * 16V * 60}{12.5 * 1000} = 5.376 \text{ KJ/mm}$$

La energía neta aportada (ENA), es la energía real que recibe la pieza y se calcula según la relación (6):

$$ENA = r_1 (EBA) \quad \text{Para el proceso TIG, } r_1 = 0.65$$

$$ENA = 0.65 * 5.376 \text{ KJ/mm}$$

$$ENA = 3.40 \text{ KJ/mm}$$

El rendimiento térmico se define como la parte de energía neta aportada (ENA) empleada en fundir el metal y se expresa (6):

$$r_2 = \frac{QAs}{ENA}$$

Q = calor teórico para el acero (10 J/MM<sup>3</sup>)  
As = Area del cordón de soldadura (área del metal aportado más el área del metal base fundido) : 72.2 mm<sup>2</sup>

r<sub>2</sub> = Rendimiento térmico

$$r_2 = \frac{70J/mm^3 * 72.2mm^2}{3.49 \text{ KJ/mm} * 1000} = 0.21$$

$$r_2 = 0.21$$

Esto significa que el 21% del calor liberado en el proceso se emplea para fundir el metal y el resto se pierde por conducción.

Los electrodos base níquel requieren menos amperaje que una varilla de E-347 desnuda, generando bajo calor porque es una aleación con alto cromo y por lo tanto evita que se sencitice el AISI 321H.

En trabajos de refinería del petróleo donde las condiciones de los medios corrosivos son severos, es pertinente utilizar el inconel 182 para la soldadura de raíz.

Para los cordones de relleno se utilizó el electrodo AWS E-347 estabilizado con Culombio. Es de anotar que no

existen electrodos estabilizados con titanio porque este componente no pasa el arco eléctrico, es decir, se evapora en el proceso de soldadura.

Las características del electrodo ASW E-347 son las siguientes: <sup>(6)</sup>

C = 0.08%

Cr = 18-25%

Ni = 9.0 - 11.0%

Cb= 8%

Mn= 2.5%

Si = 0.9%

P = 0.04%

S = 0.03%

Resistencia a tensión = 80.000 psi

Elongación = 30%

Diámetro electrodo = 1/8 pulgada

El cálculo de los contenidos de cromo y níquel equivalentes según fórmulas se muestran en la figura 1 y los siguientes son los valores:

Para el rango inferior

Para el rango superior

[Cr] = 19.76%

[Cr] = 22.67%

[Ni] = 12.65%

[Ni] = 14.65%

Al graficar en el diagrama de Shaeffler se obtiene un rectángulo que indica la estructura del material de aporte correspondiente a austenita más ferrita de 0 a 10%.

Para los pases de relleno se utilizaron los siguientes parámetros:

POSICIÓN DE SOLDADURA	AMPERAJE (A)	TENSIÓN (V)	VELOCIDAD (mm/min)	POLARIDAD
1G	100	23	120	CDPI
3G	90	22	110	CDPI
4G	80	21	100	CDPI

PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO manual con electrodo revestido SMAW.

Máquina Miller modelo XMT 300 cc/cv.

Se depositaron dos cordones de relleno con movimiento circular eliminando la escoria con un cepillo de alambre de acero inoxidable.

Con base en las fórmulas se calculan la energía bruta aportada (EBA), la energía neta aportada (ENA) y el rendimiento térmico r<sub>2</sub> que se muestran a continuación:

POSICIÓN DE SOLDADURA	EBA (Kj/mm)	ENA (Kj/mm)	$r_2$
1G	1.15	0.920	0.78
3G	1.08	0.864	0.83
4G	1.008	0.800	0.90

Para el proceso SMAW el valor de  $r_1 = 0.80$   
 De los datos anteriores se deduce que la EBA y ENA es baja durante el proceso, lo cual se considera positivo en la soldadura del acero AISI 321H.  
 Es de anotar que el pase de raíz y los de relleno se pueden realizar con el electrodo AWS E-347.  
 El acero AISI 321H soldado tiene aplicación para servicios de hidrocarburos livianos o pesados, fracciones de gasolinas, gasóleos livianos, crudos, todos contaminados con hidrógeno, azufre, ácido sulfídrico, cloro y sus mezclas, equipos para procesar alimentos, recipientes de nitruración múltiples de escape, cajas de carbonitruración, etc.

## 4. CONTROL DE CALIDAD

### 4.1 ENSAYOS DE DOBLEZ DE CARA, RAIZ Y SANIDAD

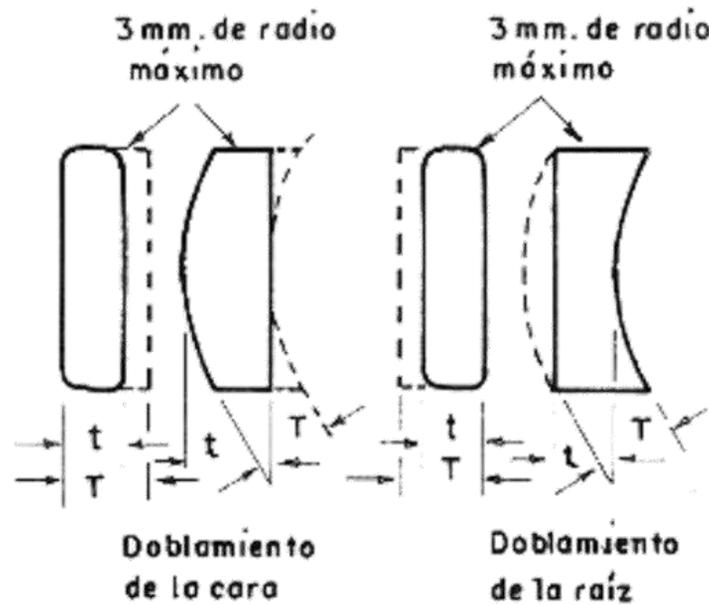
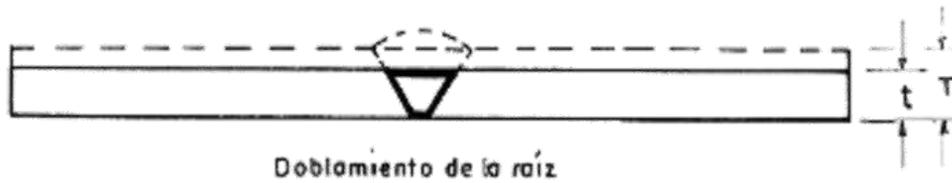
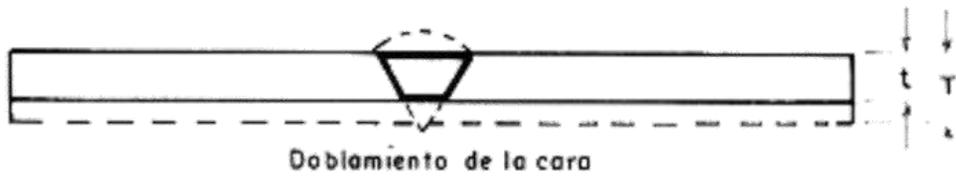
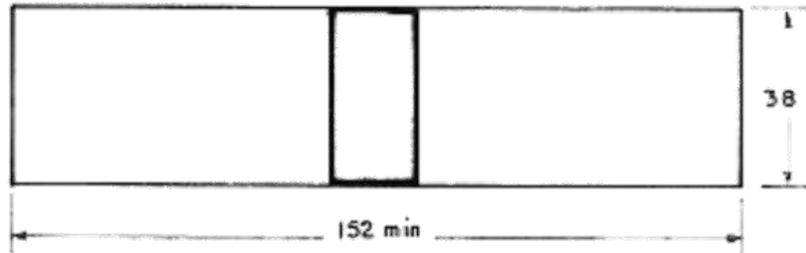
Se preparó una probeta soldada en cada una de las posiciones de soldadura y se sometió a pruebas de doblez de cara y de raíz. El diseño de las probetas se muestra en la figura 6. Para el ensayo de sanidad se realiza una muesca o hendidura de 1/8 pulgada en los extremos de la soldadura con el fin de que la probeta rompa a través de ella mediante un ensayo de tensión y se pueden observar sus posibles defectos.  
 El diseño de las probetas obedecen la norma técnica colombiana ICONTEC N° 2156 equivalente a la ASTM E190.

Los resultados de estos análisis se muestran en la tabla 2.

TABLA 2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARA, RAIZ Y SANIDAD

POSICION DE SOLDADURA	RAIZ	CARA	SANIDAD
1G	Agrietamiento en zona aledaña a la soldadura. Daño en la zona afectada por calentamiento.	No se observan defectos.	Fractura de grano fino. No se observan defectos.
3G	No se observan defectos	Se observan tres grietas en la soldadura de longitud promedio de 2.98 mm. Según la norma es permisible.	Fractura de grano fino. No se observan defectos.
4G	No se observaron defectos.	Se observaron diez grietas en la soldadura de longitud promedio de 4.85 mm. Según la norma no es permisible.	Se observan puntos brillantes que indican falta de fusión e inclusiones de escoria. Según norma no es permisible.

*"La corrosión intergranular de los aceros inoxidables austeníticos se basa en la precipitación de carburos de cromo en los bordes de grano de la austenita y que ocasionan descromatización alrededor del grano".*



T		t	
mm.	pulg.	mm.	pulg.
2 a 3	1/16 - 1/8	T	T
3 a 9.5	1/8 - 3/8	T	T
> 9.5	> 3/8	9.5	3/8

FIGURA 6 PROBETAS PARA DOBLAMIENTO TRASVERSAL DE LA RAÍZ Y DE LA CARA No. 7

## 4.2 ENSAYOS DE TENSION Y DE DUREZA

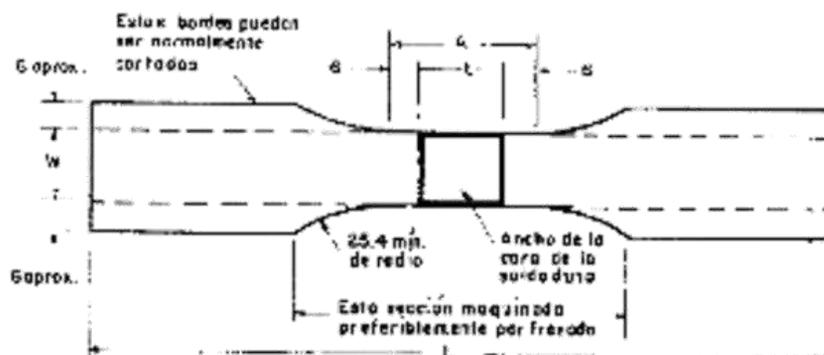
Se prepararon probetas para tensión y dureza del metal base y de soldadura en las tres posiciones diseñadas según la Norma Técnica Colombiana ICONTEC 2156 equivalente a la norma ASTM E190 como se muestra en la figura 7. Los resultados se muestran en la tabla 3.

De datos de la tabla 3, se puede deducir que las probetas de la POSICIÓN 1G y 3G tienen mayor resistencia a la tensión que el metal base, lo que nos demuestra la buena calidad de la soldadura. En cambio la probeta soldada en posición 4G, tiene una resistencia menor a la del metal base, aunque puede ser permisivo su empleo de acuerdo a las condiciones de servicio requeridas.

En cuanto a la dureza el mayor valor es la del metal base y los otros valores corresponden a la soldadura en sus diferentes posiciones. Es de anotar que para hallar el valor de dureza de la soldadura se tomó un valor en la raíz, otro en el relleno y un último en la interfase Inconel - metal de relleno y luego se halló el valor promedio. Los valores son menores que el de metal base debido al efecto que ocasionan los cordones superiores sobre los inferiores.

TABLA 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL METAL BASE Y DE LA SOLDADURA

PROPIEDAD	RT (psi)	DUREZA (BHN)	TAMAÑO DE GRANO
			NORMA ASTM E 112-58T
PROBETA			58T
Metal Base	76.730	187	7
1G	94.102	183	8
3G	88.154	186	8
4G	72.079	185	



" Los aceros inoxidable austeníticos calentados a temperaturas de 950°C a 1000°C, disuelven los carburos de cromo y luego con enfriamientos rápidos al aire impiden la precipitación de los carburos de cromo".

"La presencia de titanio y Niobio en el acero inoxidable evita la precipitación de carburos de cromo porque estos elementos son más ávidos de carbono y nitrógeno formando carburos y nitruros que se precipitan en el interior de los granos".

Dimensiones	
Lámina de ensayo	
$T \leq 25.4 \text{ mm} . (1 \text{ pulg.})$	
A. Longitud de la sección reducida mm (pulg.)	Cara más ancha de la soldadura + 13 (½).
L. Longitud total aproximada	254 (10) ó como se requiere para el equipo de ensayo.
W. Aproximada mm (pulg.)	38 ( 1 ½).
t. Espesor del espécimen	T

FIGURA 7. Probeta de sección reducida para resistencia a la tensión .(7)

## 5. CONCLUSIONES

El diagrama de Shaeffler permite la selección del electrodo más adecuado para soldar aceros inoxidable.

La soldadura se efectúa con material de aporte cuya composición química debe ser aproximada a la del metal base pero con contenidos de ferrita  $\delta$  del 5 al 10% para evitar la tendencia al agrietamiento.

Para el proceso de soldeo del acero AISI 321H no se requiere precalentamiento ni tratamiento térmico posterior puesto que es un acero estabilizado.

En el proceso de soldadura de este acero se puede utilizar solamente el electrodo AWS E-347 para los pases de raíz y de relleno.

El acero AISI 321H no es endurecible por tratamiento térmico, pero pueda ser altamente endurecido por trabajado en frío.

El acero AISI 321H tiene baja conductividad térmica y alto coeficiente de expansión térmica, por lo tanto puede presentar problema de distorsión, por eso, se debe utilizar un electrodo de diámetro pequeño y cordones de longitudes cortas.

La energía neta lineal aplicada (ENA) para el pase de raíz y los pases de relleno son bajas lo cual es positivo para soldar estos aceros.

Si la unión soldada debe trabajar a altas temperaturas, el electrodo debe garantizar la mínima cantidad de ferrita d entre 2 al 4% y estar estabilizados con Niobio o Culombio; la mínima cantidad de ferrita garantiza evitar la formación de la fase sigma que como se sabe se origina preferiblemente a partir de la ferrita.

El material de aporte debe tener elementos estabilizadores como Niobio o Culombio, para evitar la formación de carburos de cromo  $Cr_{22}C_6$  y desde luego la corrosión intergranular. Se anota que el electrodo utilizado AWS E347 no tiene titanio porque este elemento no pasa al arco eléctrico, es decir se evapora en el proceso de soldadura.

## BIBLIOGRAFÍA

1. THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. The procedure Handbook of Arc Welding - Cleveland, Ohio, Twelfth Edition. 1973.
2. FREDRIRS H. and VAN DER TOORN L.J. Agrietamiento en caliente de las costuras de los aceros inoxidable austeníticos. British Welding journal. V. 15. P. 178-182. 1968.
3. FONTANA M.G. GREENE N. corrosión Engineering, Second Edition, Mc Graw Hill. Book company Ny-1978.
4. SEFERIAN DANIEL. Metalurgia de la Soldadura. Pierre Chevenard p402. Editorial Ciencia y técnica.
5. THIELSCH HELMUT. Defectos y roturas en recipientes a presión y tuberías . P 440. Editorial Urno. Bilbao - España. 1969.
6. REINA GÓMEZ, Manuel. Soldadura de los aceros. Aplicaciones. Universidad Politécnica de Madrid.
7. Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC . 1995

## RECONOCIMIENTO

Al tecnólogo Mario Tapias Rincón, Asistente de los Laboratorios de Metales Y Aleaciones y Resistencia de Materiales de la Universidad Francisco de Paula Santander.

