



# **PROPIEDADES Y SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES**

## LINCOLN KD

El término acero inoxidable se usa para cubrir una amplia variedad de grados y composiciones. En términos generales, un acero se puede considerar inoxidable cuando posee en su composición química un porcentaje superior al 13% de Cromo. Estos aceros se clasifican en cinco familias, en función de su estructura metalográfica, la cual determina sus propiedades mecánicas y también su soldabilidad. Además, cada familia tiende a conservar una naturaleza común en términos de su susceptibilidad o resistencia a formas particulares de corrosión.

1. Aceros inoxidables ferríticos
2. Aceros inoxidables austeníticos
3. Aceros inoxidables martensíticos
4. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación
5. Aceros inoxidables dúplex ferrítico-austeníticos

Antes de entrar en la descripción de estas características determinantes de cada familia de aceros inoxidables, es conveniente repasar el efecto de los diferentes elementos de aleación de estos aceros, los cuales determinan según su presencia, qué estructura metalográfica es más estable a cada rango de temperaturas:

## EFFECTOS DE LOS COMPONENTES DE LOS ACEROS INOXIDABLES

### CROMO

Es el único elemento imprescindible para la formación de la película pasivada que proporciona resistencia a la corrosión del acero. Otros elementos, además, pueden activar el cromo para la formación o el mantenimiento de dicha película, pero ellos mismos no pueden crear las propiedades de los aceros inoxidables en este sentido.

La película puede observarse ya cuando el contenido de cromo es de 10,5%, pero sobre todo dependiendo de la composición del acero, esta película es muy susceptible de romperse en medios medianamente agresivos.

Incrementando el contenido de cromo hasta un 17-20% como en el caso de los aceros inoxidables austeníticos, o al 26-29% como los ferríticos más recientes, se aumenta enormemente la estabilidad de la película pasivada. Sin embargo, un contenido de cromo excesivamente elevado puede afectar las propiedades mecánicas, la soldabilidad o las posibles aplicaciones de aceros que han de estar expuestos a elevadas temperaturas.

Así resulta que, a menudo, es más eficiente aumentar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables incrementando su contenido en otros elementos sin elevar su contenido de cromo.

## NÍQUEL

En suficientes cantidades es estabilizador de la estructura austenítica. Es un elemento muy efectivo en la reformación de la capa pasivada una vez ha quedado destruida, especialmente en medios reductores. El níquel es particularmente útil para aumentar la resistencia a la corrosión en medios ácidos minerales. Cuando su contenido es superior a 8-10% decrece la resistencia a SCC, que no vuelve a aumentar hasta que la cantidad de níquel se acerca al 30%.

En los nuevos aceros inoxidable ferríticos, en los que la adición de níquel es menor que la requerida para desestabilizar la fase ferrítica, produce efectos substanciales, como aumento de la resistencia mecánica, la tenacidad y la resistencia en ácidos reductores, aunque el acero inoxidable queda con mayor susceptibilidad a la corrosión SCC en soluciones concentradas de cloruros.

## MANGANESO

En moderadas cantidades y en asociación con el níquel proporciona muchas de las cualidades de este último. Sin embargo, no es práctico substituir totalmente al níquel por el manganeso.

Los aceros con altos contenidos de manganeso tienen algunas propiedades no usuales y útiles. El manganeso interactúa con el azufre de los aceros inoxidable formando sulfuro de manganeso que puede tener efectos importantes respecto a la resistencia a la corrosión, especialmente por picaduras.

## MOLIBDENO

En combinación con el cromo es muy efectivo en términos de estabilizar la película pasivada en presencia de cloruros. Es especialmente efectivo para evitar la iniciación de fisuras y picaduras de corrosión.

## CARBONO

Es útil ya que aumenta la capacidad de endurecimiento mediante tratamiento térmico al resultar un acero susceptible de transformación martensítica.

En general, el carbono disminuye la resistencia a la corrosión del acero inoxidable al formarse carburos de cromo en los límites de grano, de características catódicas frente al resto del acero.

## NITRÓGENO

Beneficia a los aceros inoxidable austeníticos en cuanto a su resistencia a corrosión por picaduras, retardando la formación de la fase  $\gamma$ -cromo-molibdeno.

Su presencia es esencial en los nuevos tipos de aceros inoxidable dúplex ya que incrementa el contenido de austenita y disminuye la segregación de cromo y molibdeno, aumentando así la resistencia a la corrosión de la fase austenítica. Sin embargo, el nitrógeno disminuye enormemente las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable ferríticos y debe ser tratado como el carbono en este tipo de aceros, añadiendo elementos estabilizadores cuando su contenido comienza a ser elevado.

### 1. ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

Los más simples de esta familia de aceros inoxidable contienen únicamente hierro y cromo, de forma que la estabilización de la fase ferrítica aumenta con el contenido de cromo. La ferrita tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC), mostrando muy pequeña solubilidad de elementos intersticiales como nitrógeno y carbono.

Son aceros inoxidable que presentan propiedades magnéticas y elevada resistencia mecánica, aunque son de baja ductilidad y endurecibles por acritud. La transición de comportamiento dúctil a frágil se puede presentar a relativamente altas temperaturas, incluso a temperatura ambiente cuando los contenidos de carbono, nitrógeno y cromo son elevados.

Los tipos de inoxidable ferríticos más utilizados son AISI 446 para aplicaciones de resistencia a la oxidación y AISI 430 y 434 para aplicaciones de corrosión en automoción. Sin embargo, estos tipos son muy sensibles a la corrosión intergranular como resultado de soldaduras o exposiciones a altas temperaturas que limitan su vida. La actividad del carbono o del nitrógeno puede disminuirse con el uso de elementos estabilizadores, como titanio o niobio, en los aceros del tipo AISI 444.

Estos tipos de aceros son muy resistentes e incluso inmunes a rotura por corrosión bajo tensión en ambiente de cloruros (SCC), por lo que son muy utilizados en intercambiadores de calor. Estas propiedades son responsables del extraordinario desarrollo de aceros ferríticos de baja aleación, como AISI 409, ampliamente usados en aplicaciones de exposición en atmósferas moderadamente severas.

## LINCOLN KD

### EJEMPLOS DE ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS (AISI)

430 : 17Cr, 0,08C	
446 : 26Cr, 0,18C : Alto Cr para máxima resistencia a oxidación y medios sulfurosos.	
444 : 18,5Cr, 2Mo, 0,02C +Ti (Nb) Alto Cr y Mo para resistencia a corrosión general y picaduras.	18Cr, 2Mo + S Adición de S para fácil mecanizado. Resistencia a corrosión equiparable a AISI 316.
409 : 11,5Cr, 0,06C + Ti : Bajo C. Estabilizado con Ti para mejora de soldabilidad.	
410 : 12,5Cr, 0,06C : Bajo Cr. Aplicaciones especiales.	
405 : Bajo Cr. Mejor soldabilidad que el 410.	

### Composición química de los ferríticos más comunes:

Design. UNS	Tipo AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Otros
S40500	405	0,08	1,00	0,04	0,03	1,00	11,50-14,50	...	...	0,1-0,3Al
S40900	409	0,08	1,00	0,045	0,04	1,00	10,50-11,75	...	...	Ti:6xC-0,75
S42900	429	0,12	1,00	0,04	0,03	1,00	14,00-16,00	...	...	...
S43000	430	0,12	1,00	0,04	0,03	1,00	16,00-18,00	...	...	...
	430F	0,12	1,25	0,06	0,15	1,00	16,00-18,00	...	0, 60	...
	430Se	0,12	1,25	0,06	0,06	1,00	16,00-18,00	...	...	>0,15Si
S43400	434	0,12	1,00	0,04	0,03	1,00	16,00-18,00	...	0,7-1,25	...
S43600	436	0,12	1,00	0,04	0,03	1,00	16,00-18,00	...	0,7-1,25	Nb:5xC-0,7
S44200	442	0,20	1,00	0,04	0,03	1,00	18,00-23,00	...	...	...
S44400	444	0,25	1,00	0,04	0,03	1,00	17,50-19,50	...	...	(Ti+Nb):0,2 +4(C+N)-.8
S44600 No standar	446	0,20	1,50	0,04	0,03	1,00	23,00-27,00	...	...	0,25N
S44627	Brite	0,01	0,40	0,02	0,02	0,40	25,0-27,0	0,50	0,7-1,5	0,1Nb0,2Cu 0,015N
S44635	Monit	0,025 0,025	1,00	0,04	0,03	0,75	24,5-26,0	3,5-4,5	3,5-4,5	0,035N+Ti +Nb
S44660	Sea Cure		1,00	0,04	0,03	1,00	25,0-27,0	1,5-3,5	2,5-3,5	0,035N+Ti+ Nb
S44735		0,03	1,00	0,04	0,03	1,00	28,0-30,0	1,00	3,6-4,2	0,045N+Ti+ Nb
S4473S		0,03	1,00	0,04	0,03	1,00	28,0-30,0	1,00	3,6-4,2	0,045N+Ti+ Nb
S44800		0,01	0,30	0,025	0,02	0,20	28,0-30,0	2,0-2,5	3,5-4,2	0,15Cu 0,02N

## 2. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Los elementos estabilizadores de la austenita son, principalmente, el níquel y el manganeso. La estructura cristalina de estos aceros es cúbica centrada en las caras (FCC), la cual permite mayor solubilidad del carbono y del nitrógeno.

Estos aceros no presentan propiedades magnéticas y generalmente tienen baja resistencia mecánica (comparada con otros inoxidable), elevada ductilidad, excelente tenacidad y altas velocidades de endurecimiento por acritud. Estas propiedades, combinadas con la sencillez de su fabricación hacen de estos aceros, especialmente los AISI 304, los más comunes de los aceros inoxidable.

La resistencia a la corrosión aumenta con adiciones de molibdeno y la estabilización de la fase austenita mejora con incrementos de nitrógeno.

Para resistencia a elevadas temperaturas se utilizan las aleaciones de alto contenido en cromo y para atmósferas corrosivas de compuestos inorgánicos, las de alto contenido en níquel.

Estos aceros pueden quedar sensibilizados a corrosión intergranular por soldadura o por largos períodos de tiempo de exposición a elevadas temperaturas, ya que con ello se produce precipitación de carburos de cromo en los límites de grano, empobreciéndose por tanto el acero en este elemento en las proximidades de dichos carburos. Este fenómeno puede prevenirse mediante el uso de tipos de aceros de bajo contenido en carbono (grados *low carbon* =L < 0,03%C) o tipos con elementos estabilizadores, como AISI 321 y 347, con titanio y niobio, respectivamente.

### **EJEMPLOS DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS (AISI)**

302: 18Cr, 9Ni, 0,08C		
309 : 23Cr, 13Ni, 0,15C ACERO REFRACTARIO Alto Cr para resistencia a oxidación a elevadas temperaturas.	310 : 25Cr, 20Ni, 0,12C ACERO REFRACTARIO Mayor Ni para máxima resistencia a oxidación a altas temperaturas.	21Cr, 11Ni, 0,08C,Ce+N Ce y N para máxima resistencia a oxidación y formación de fase sigma.

**LINCOLN KD**

<p>904L : 20Cr, 25Ni, 4,5Mo, 1,5Cu, 0,03C Mayor Cr y Mo para resistencia a corrosión por picaduras (pitting). Mayor Ni y Cu para resistencia a corrosión bajo tensiones y general.</p>		<p>27Cr, 31Ni, 3,5Mo, 1,5Cu, 0,02C Cr y Mo para resistencia a picaduras. Ni y Cu para resistencia a corrosión bajo tensiones y general.</p>
<p>317 : 19Cr, 13Ni, 3,25Mo, 0,07C Mayor Mo para mejor resistencia a picaduras.</p>	<p>317L : 19Cr, 13Ni, 3,25Mo, 0,03C Menor C para resistencia a sensibilización sigma.</p>	<p>20Cr, 18Ni, 6Mo, 0,1N, 0,02C Mayor contenido de aleación para resistencia a picaduras.</p>
<p>316 : 18Cr, 12Ni, 2,25Mo, 0,06C Adición de Mo para resistencia a picaduras.</p>	<p>316L : 17Cr, 12Ni, 2,25Mo, 0,03C Bajo C para resistencia a la sensibilización.</p>	<p>316Ti : 17Cr, 12Ni, 2,25Mo, 0,08C, 0,5Ti Versión estabilizada para resistencia a sensibilización.</p>
<p>305 : 18Cr, 12Ni, 0,08C . Mayor Ni para disminuir velocidad de endurecimiento por acritud.</p>		
<p>304 : 18,5Cr, 9Ni, 0,06C Menor C para mejorar soldabilidad.</p>	<p>304L : 18,5Cr, 9,5Ni, 0,03C Menor C para resistencia a sensibilización.</p>	<p>321 : 18Cr, 10Ni, 6C=Ti Versión estabilizada.</p>
<p>301 : 17Cr, 7Ni, 0,08C Bajo Cr y Ni para elevada velocidad de endurecimiento por acritud.</p>		<p>202 : 18Cr, 5Ni, 9Mn, 0,15N, 0,08C Menor coste para substituir al 302</p>
<p>303 : 18Cr, 9Ni, 0,12C, 0,25S Adición de S para fácil mecanizado</p>		<p>201 : 17Cr, 4,5Ni, 6,5Mn, 0,15N, 0,12C Menor coste para substituir al 301</p>

## LINCOLN KD

### Composición química de los austeníticos más comunes:

Design. UNS	Tipo AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Otros

### 3. ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

Tienen bajo contenido de cromo y carbono, por lo que es posible obtener estructura austenítica a elevadas temperaturas, a partir de la cual, mediante altas velocidades de enfriamiento, se obtiene una estructura martensítica, tetragonal centrada en el cuerpo (BTC).

Estos aceros combinan una elevada resistencia mecánica con una adecuada tenacidad en sus estados de revenido. Sin embargo, debido a que el contenido total equivalente de cromo es pequeño, la resistencia a la corrosión es a veces limitada. Recientemente, mediante adiciones de nitrógeno, níquel y molibdeno se ha logrado aumentar su tenacidad y su resistencia a la corrosión.

#### EJEMPLOS DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS (AISI):

410 : 12,5Cr, 0,1C		
431 : 16Cr, 2Ni, 0,18C. Adición de Cr para mayor resistencia a corrosión		
416 : 12,5Cr, 0,1C, 0,2S. Adición de S para fácil mecanizado		
420 : 12,5Cr, 0,25C Mayor C para mayor dureza	420C : 12,5Cr, 0,3C Mayor C para mayor dureza	440 : 17Cr, 1,1C Mayor C para mayor dureza
403 : 13Cr, 0,15C. Ductilidad mejorada.		



## LINCOLN KD

### Composición química de los martensíticos más comunes:

Design. UNS	Tipo AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Otros
S40300	403	0,15	1,00	0,04	0,03	0,50	11,50-13,00	...	...	...
S41000	410	0,15	1,00	0,04	0,03	1,00	11,50-13,50	...	...	...
S41400	414	0,15	1,00	0,04	0,03	1,00	11,50-13,50	1,25-2,5	...	...
S41600	416	0,15	1,25	0,06	>0,15	1,00	12,00-14,00	...	0,60	...
	416Se	0,15	1,25	0,06	0,06	1,00	12,00-14,00	...	...	>0,15Se
S42000	420	>0,15	1,00	0,04	0,03	1,00	12,00-14,00	...	...	...
	420F	>0,15	1,25	0,06	>0,15	1,00	12,00-14,00	...	0,60	...
S42200	422	0,20-0,25	1,00	0,025	0,025	0,75	11,00-13,00	0,5-1,0	0,7-1,25	0,15-0,3V 0,7-1,2W
S43100	431	0,20	1,00	0,04	0,03	1,00	15,00-17,00	1,25-2,5	...	...
	440A	0,60-0,75	1,00	0,04	0,03	1,00	16,00-18,00	...	0,75	...
	440B	0,75-0,95	1,00	0,04	0,03	1,00	16,00-18,00	...	0,75	...
	440C	0,95-1,20	1,00	0,04	0,03	1,00	16,00-18,00	...	0,75	...
No standar										
S41040	XM-30	0,15	1,00	0,04	0,03	1,00	11,50-13,50	...	...	0,05-0,2Nb
S41610	XM-6	0,15	2,50	0,06	0,15	1,00	12,00-14,00	...	0,60	...

#### **4. ACEROS INOXIDABLES ENDURECIBLES POR PRECIPITACIÓN**

Son aceros inoxidable al cromo-níquel, endurecidos por tratamientos de envejecimientos a temperaturas moderadamente elevadas. Pueden tener estructuras austeníticas, semiausteníticas o martensíticas.

La precipitación de compuestos se logra mediante adiciones de aluminio o cobre, que forman precipitados intermetálicos durante el tratamiento de envejecimiento (cortos períodos de tiempo a 480-620°C).

La resistencia a la corrosión de estos aceros puede ser comparable a la de los tipos de aceros cromo-níquel, pero se ha de tener en cuenta que sus propiedades mecánicas pueden verse afectadas por la disminución en la proporción de precipitados al ser soldados o estar expuestos a altas temperaturas.

#### **Composición química de los aceros inoxidables endurecibles más comunes:**

Design. UNS	Tipo AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Otros
S13800		0,05	0,20	0,010	0,08	0,10	12,25-13,25	7,5-8,5	2,0-2,5	0,9-1,3Al+0,01N
S15500		0,07	1,00	0,04	0,03	1,00	14,00-15,50	3,5-5,5	...	2,5-4,5Cu+0,15-0,5Nb
S17400		0,07	1,00	0,04	0,03	1,00	15,50-17,50	3,0-5,0	...	3,0-5,0Cu
S17700		0,09	1,00	0,04	0,04	0,04	16,00-18,00	6,5-7,5	...	0,15-0,5Nb 0,75-1,5Al
No estandar S31800	PH13-8Mo	0,05	0,20	0,01	0,008	0,10	12,25-13,25	7,5-8,5	2,0-2,5	0,9-1,35Al+0,01N
S45000	Custom 450	0,05	1,00	0,03	0,03	1,00	14,00-16,00	5,0-7,0	0,5-1,0	1,25-1,75Cu Nb>8xC
S45500	Custom 455	0,05	0,50	0,04	0,03	0,50	11,00-12,50	7,5-9,5	0,5	0,8-1,4Ti

## **5. ACEROS INOXIDABLES DUPLEX**

Son aceros inoxidable al cromo-molibdeno con suficiente proporción de estabilizadores ganmágenos como para que presenten a temperatura ambiente estructura mezcla de austenita y ferrita, en diferentes porcentajes.

Como contienen suficiente cantidad de cromo y molibdeno presentan la excelente resistencia a la corrosión de los inoxidable ferríticos, y las buenas propiedades mecánicas de los inoxidable austeníticos. En realidad, los inoxidable dúplex contienen prácticamente la misma cantidad de austenita que de ferrita y conservan una excelente tenacidad a la vez que su resistencia mecánica es superior a la que presenta cada fase de forma singular.

La primera generación de estos inoxidable fue el tipo AISI 329, con un porcentaje de ferrita entre el 75 y 80% y mejores propiedades en estado de recocido que cualquier inoxidable austenítico, pero las segregaciones de cromo y molibdeno que se producen entre las fases, inevitables durante la soldadura, a menudo reducen mucho la resistencia a la corrosión intergranular de estos aceros.

La adición de nitrógeno a las siguientes generaciones de estos aceros hace regenerar las fases más rápidamente y minimiza las segregaciones de cromo y molibdeno, incluso sin necesidad de realizar tratamientos de recocido tras la soldadura.

Los más nuevos de estos tipos de aceros inoxidable combinan una elevada resistencia mecánica, buena tenacidad, alta resistencia a la corrosión, buena resistencia a la corrosión en atmósfera de cloruros (SCC), a la vez que tienen un costo de producción algo más económico, si se consideran todas las mejoras en propiedades que con ellos se obtienen.

Debido a que estos aceros son aún algo nuevos respecto a su grado de utilización en la industria general, a continuación se indican algunas recomendaciones de los tratamientos más usuales:

### a) Conformado en frío:

Se puede realizar con los mismos métodos que los aceros inoxidable austeníticos, aunque se debe tener en cuenta que la fuerza inicial necesaria para deformar plásticamente a los inoxidable dúplex es superior, ya que también lo es su límite elástico. Su nivel de endurecimiento por deformación es aproximadamente el mismo que el de los austeníticos, y generalmente no se requiere tratamiento térmico de relajación de tensiones, salvo cuando el grado de reducción en frío sobrepasa el 15%, sobre todo en aquellos aceros que vayan a ser destinados a condiciones extremas de corrosión.

### b) Conformado en caliente:

Se realiza a 1000-1100°C. Si la temperatura es superior a los 1000°C puede enfriarse rápidamente el material consiguiendo ya la estructura dúplex ferrítico-austenítica, y si es inferior o cercana a los 1000°C deberá hacerse un tratamiento térmico de temple tras el conformado.

### c) Forja:

## LINCOLN KD

Se recomienda trabajar a 1150-1250°C y enfriar después en agua o aire.

### d) Tratamiento térmico de solubilización:

Se realiza a 1000-1100°C enfriando después rápidamente en agua.

### e) Mecanizado:

Debido a su microestructura, el mecanizado exige parámetros y técnicas algo diferentes de los aceros ordinarios y austeníticos: las máquinas-herramienta han de ser robustas y ampliamente dimensionadas para conseguir una eficaz disipación del calor.

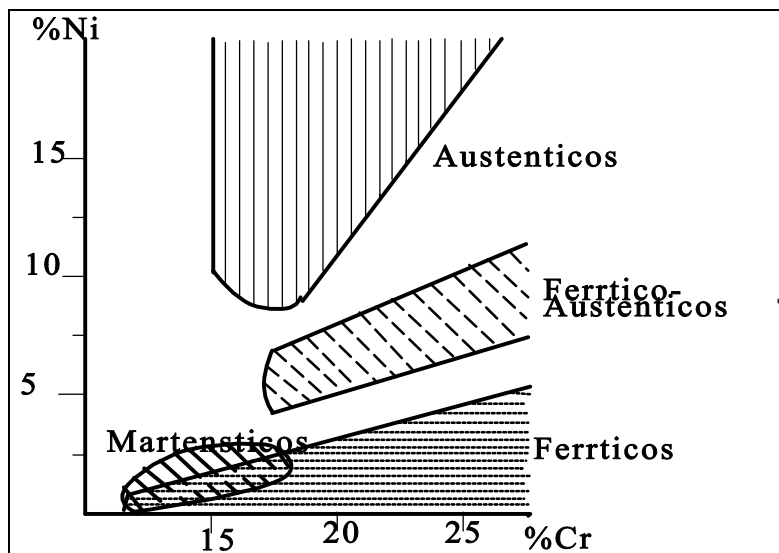
Las velocidades de corte deben ser de un 60-75% de las velocidades de mecanizado con herramientas de metal duro, y 100% de las mismas para herramientas de acero rápido.

## Composición química de los aceros inoxidables dúplex más comunes:

Design. UNS	Tipo AISI	C max.	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Otros
S31500	SAF3RE60	0,03	1,6	1,7	18,5	4,9	2,7	...	0,07	...
S32404	Uranus50	0,04	2,0	<1,0	21,5	7,0	2,5	1,5	0,1	...
S31803	Alloy2205	0,03	2,0	<1,0	22	5,5	3,0	...	0,15	...
S32304	SAF2304	0,03	2,5	<1,0	23	4,0	0,5	...	0,1	...
S32900	329SS	0,2	1,0	<0,75	25,5	3,75	1,5	...	...	...
S31100	IN744	0,05	1,0	<0,6	26	6,5	...	...	...	...
S31200	44LN	0,03	2,0	<1,0	25	6,5	3,0	...	0,17	...
S32950	7MoPlus	0,03	2,0	<0,6	27,5	4,4	1,8	...	0,25	...
S31260	DP-3	0,3	1,0	<0,75	25	6,5	3,0	0,5	0,2	0,3W
S32250	Ferralium all.255	0,04	1,5	<1,0	25,5	5,5	3,0	1,7	0,17	...
	Zeron100	0,02	0,6	<1,0	25	9,5	3,5	0,7	0,22	0,7W

**LINCOLN KD**

A continuación se representan las estructuras más probables de aceros inoxidable según su relación entre los contenidos de cromo y níquel:



## MECANISMOS DE RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

En general, el término CORROSIÓN hace referencia a la reacción que tiene lugar entre un material y el medio ambiente que lo rodea y a partir de la cual las propiedades del material quedan modificadas, normalmente disminuidas o empeoradas.

Debido a que el principal elemento no inerte que se encuentra en la atmósfera es el oxígeno, el fenómeno más frecuente de corrosión es la OXIDACIÓN.

Los diferentes tipos de corrosión que pueden sufrir los materiales y, particularmente los materiales metálicos, se pueden clasificar:

1. Según la apariencia de la corrosión:
  - Corrosión uniforme o generalizada
  - Corrosión localizada (inter o intracristalina y picaduras)
2. Según el tipo de reacción que tiene lugar:
  - Corrosión química o seca
  - Corrosión electroquímica o húmeda
3. Según los factores que influyen en la corrosión:
  - Factores metalúrgicos (naturaleza y estado de los materiales) y de diseño (corrosión bajo tensión, fatiga con corrosión, corrosión por fricción, erosión, etc.).
  - Factores ambientales (corrosión atmosférica, corrosión por hidrógeno, presencia de corrientes erráticas, corrosión por aireación diferencial, corrosión bacteriana, descarburación, etc.).

El mecanismo de protección contra la corrosión de los aceros inoxidable difiere de los aceros al carbono y aleados y de otras muchas aleaciones; en este caso el mecanismo es la formación de una barrera de óxido que aísla el metal del ambiente que lo rodea. El grado de protección es función del grosor de la capa de óxido formado, su continuidad, su coherencia y su adhesión con el metal base, así como de la difusividad del oxígeno en el óxido y en el metal base.

En elevadas temperaturas, la resistencia a la oxidación de los aceros inoxidable puede ser explicada por este mecanismo; sin embargo, a bajas temperaturas, en los aceros inoxidable no se forma realmente esta capa de óxido, sino una película pasivada. Uno de los mecanismos que intentan explicar la formación de esta película sugiere que lo que se forma es un film de óxido hidratado, pero esto no está totalmente de acuerdo con el óxido complejo que se encuentra en la superficie del metal. Sin embargo, la película pasivada sigue siendo no porosa, insoluble y autoformable, cuando se rompe en presencia del oxígeno.

## LINCOLN KD

Hay cierta confusión sobre el significado del término PASIVACIÓN:

No es necesario un tratamiento químico de la superficie del acero para obtener una película pasivada, sino que ésta se forma espontáneamente en presencia de oxígeno. Muchas veces la función de la pasivación es limpiar las impurezas que pueda tener la superficie del acero (hierro libre, óxidos formados durante el tratamiento térmico que se le ha dado,...), lo cual se puede lograr sumergiendo el acero en soluciones mezcla de ácidos nítrico y fluorhídrico, y una vez la superficie ha quedado limpia, la película pasivada se forma inmediatamente al exponer el acero al aire.

El rango de condiciones en que esta capa pasivada puede mantenerse depende del medio corrosivo y de la familia y composición del acero inoxidable. Cuando las condiciones son favorables para mantener la pasividad, los aceros inoxidables tienen una extremada baja velocidad de corrosión. Si la pasividad se pierde bajo condiciones que no permiten su auto-restauración, el acero inoxidable se corroerá tanto como un acero al carbono o de baja aleación.

La presencia de oxígeno es esencial para la resistencia a la corrosión del acero inoxidable: cuando alguna zona de la superficie del acero está aislada del oxígeno respecto a otras, la primera es anódica respecto a las segundas y se produce en ella una rápida corrosión por aireación diferencial.

Se considera que el mecanismo de ataque corrosivo, por ejemplo de soluciones acuosas de cloruros, en los aceros inoxidables, es el resultado de la iniciación de una picadura por rotura de la película pasivada de su superficie como consecuencia, principalmente, de heterogeneidades estructurales e inclusiones. La propagación de la picadura se produce por hidrólisis de iones metálicos disueltos y la formación de ambientes fuertemente ácidos (HCl) al proseguir la reacción de corrosión.

Además de la corrosión por picaduras o fisuras, es corriente que estos metales fallen por mecanismos de corrosión bajo tensiones (SCC = Stress Corrosion Cracking). Este fenómeno produce un crecimiento de defectos debidos a la corrosión sumamente rápido, y para que se inicie es necesaria la presencia de un ambiente corrosivo - sobre todo de cloruros- y que el material esté sometido a sollicitaciones de esfuerzos, viéndose ayudado si la temperatura es superior a 65°C.

La selección del acero inoxidable apropiado que resiste un determinado tipo de corrosión durante un tiempo suficiente, es el resultado de un balance de diseño para minimizar el costo y riesgo de corrosión en las condiciones de trabajo más desfavorables.

## RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidables pueden ser clasificados de acuerdo con su resistencia a la corrosión frente a diferentes medios. En general, pueden quedar descritos mediante el llamado ÍNDICE DE PICADURAS o PITTING INDEX (PREN), que atiende principalmente, a la composición química de cada acero, e, indirectamente a su estructura metalográfica:

<b><math>PREN = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N</math></b>
---

Los beneficios que se pueden obtener con la utilización de aceros inoxidables, en términos de la relación entre la vida de los componentes y el coste de los mismos, debe ser seriamente considerado; particularmente en materiales que han de estar expuestos en medios severos. En la tabla siguiente se propone una lista de materiales candidatos para resistir medios corrosivos por orden creciente de resistencia:

ALEACIÓN	ESTRUCTURA	COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)							PREN
		C	Cr	Mo	Ni	Cu	N	Otros	
409	Ferrítica	0,08	11	...	...	...	...	...	11
410	Martensítica	0,15	12	...	...	...	...	...	12
430	Ferrítica	0,12	17	...	...	...	...	...	17
304	Austenítica	0,08	19	...	9	...	...	...	19
316L	"	0,03	18	2,5	12	...	...	...	26
316LN	"	0,03	18	2,5	12	...	0,15	...	29
317LN	"	0,03	19	3,5	13	...	0,15	...	33
2205	Dúplex	0,03	22	3	5,5	...	0,15	...	38
904L	Super-Austen.	0,02	21	5	25	1,5	...	...	43
254SMo	"	0,02	20	6	18	0,7	0,2	...	34
Zeron100	Super Dúplex	0,02	25	3,5	9,5	0,7	0,22	0,75W	60

En esta tabla se pueden apreciar los cambios que se producen al aumentar el contenido de molibdeno de la aleación y la influencia del nitrógeno, así como de las variaciones de cromo y de níquel. En condiciones normales, esta tabla está también en ordenada según el orden creciente del coste del metal, por lo que el estudio vida-resistencia a corrosión/coste, puede muy bien ajustarse a estos mismos datos.



**LINCOLN KD**

La tabla siguiente muestra las propiedades mecánicas de algunos de estos materiales, junto con otros de utilización más o menos usual para resistir diferentes tipos de medios corrosivos y/u oxidantes. Aquí se puede comprobar que los materiales que contienen cierta proporción de nitrógeno, como el 317LN, muestran un nivel de resistencia mecánica significativamente superiores, además de, como hemos visto, una resistencia a corrosión por picaduras también más elevada:

Aleación	Límite Elástico 0,2% N/mm <sup>2</sup>	Resistencia Mecánica N/mm <sup>2</sup>
Cor-Ten A	345	485
316L	205	450-690
317LN	285	580-765
904L	195	490-690
254SMo	295	600-795
2205	345	680-880
Inconel 625	415	825
Hastelloy C-276	310	765-965

Según estos datos, los aceros inoxidable dúplex, con estructuras cristalina de aproximadamente 50% ferrita y 50% austenita, tienen unos niveles de resistencia mecánica altos, significativamente superiores a, por ejemplo, los aceros de construcción tipo Cor-Ten, lo cual supone un gran ahorro de peso en sus aplicaciones ya que permiten una enorme reducción de sección, con lo que, en parte queda amortizado el coste de algunos de sus elementos añadidos.

Otra de las grandes ventajas de los aceros inoxidable dúplex es su resistencia a la corrosión bajo tensiones, muy superior a la de los aceros inoxidable austeníticos. Por otro lado, la presencia en grandes proporciones de la fase ferrítica les confiere un menor coeficiente de dilatación lineal y una gran conductividad térmica, por lo que resultan ideales para aplicaciones de intercambio de calor.

Se ha de tener en cuenta que los aceros ferrítico-austeníticos son sensibles a fragilizaciones a temperaturas entre 450 y 500°C, y que a temperaturas superiores a los 550°C se produce la formación de la fase .

En general, su temperatura de transición de comportamiento dúctil a frágil se halla cercana a los -100°C. Se deduce, por tanto, que el rango de temperatura de trabajo recomendado es de -100 a +300°C.

## LINCOLN KD

Ya los aceros inoxidable austeníticos, como por ejemplo los AISI 304 o 316, presentan una excelente resistencia a la corrosión en ambientes medianamente agresivos, además de tener buenas propiedades mecánicas y una soldabilidad también muy buena. Se utilizan así, en un amplio campo de aplicaciones: industria alimentaria, petroquímica, farmacéutica, etc. Sin embargo, la limitación de usos de estos aceros es debida principalmente a la drástica reducción de su resistencia a la corrosión por picaduras o bajo tensiones en medios acuosos que contienen cloruros, sobre todo a temperaturas superiores a los 50-60°C.

Las alternativas que han ido apareciendo para solucionar estos problemas pueden resumirse:

1. Adición de aleantes en los aceros, con lo que se ha obtenido una gran variedad de aceros inoxidable austeníticos de alta aleación, dentro de los cuales el que ha presentado mejores propiedades de resistencia a la corrosión, a un coste relativamente económico para ambientes fuertemente agresivos, ha sido el tipo AISI 904L.
2. Empleo de aceros inoxidable ferríticos de alto contenido en cromo y molibdeno.
3. Utilización de aceros inoxidable dúplex ferrítico-austeníticos, cuyas fabricaciones actuales han supuesto un apreciable aumento en las propiedades prácticas de los aceros, en cuanto a manejo, tratamientos térmicos y soldabilidad.

La elección depende de varios factores, como las propiedades mecánicas, el coste y la soldabilidad. Esta última consideración, la soldabilidad, puede resultar crítica en cualquier tipo de acero inoxidable que se elija. Los aceros inoxidable austeníticos y los recientes dúplex presentan la mejor soldabilidad de todas las familias de aceros inoxidable descritas. Además, sus propiedades mecánicas combinadas con su resistencia a la corrosión les hacen muy deseables, siempre y cuando se tengan presentes las precauciones necesarias para asegurar áreas de soldadura que conservan todas estas propiedades.

## PREDICCIÓN DEL NÚMERO DE FERRITA (FN) PARA SOLDADURAS DE ACEROS INOXIDABLES

Se ha visto que las propiedades tanto mecánicas como de resistencia a la corrosión y soldabilidad de los aceros inoxidable dúplex varían enormemente en función de la proporción de ferrita que conserven. El creciente interés despertado por estos materiales ha dado lugar a gran cantidad de nuevas composiciones, lo cual hace necesario el utilizar un nuevo diagrama y ecuación para predecir el contenido de ferrita para las composiciones en las que se encuentran dichos aceros.

Generalmente se usa el diagrama de Schaeffler para predecir FN en las soldaduras de aceros inoxidable dúplex. Este diagrama indica los efectos o cambios en la composición con suficiente precisión siempre que nos movamos en un rango de FN relativamente bajo. Los equivalentes de Schaeffler se definen como:

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$$

Es decir, que el cromo, molibdeno, silicio y niobio son los elementos alfégenos principales, mientras que el níquel, carbono y manganeso son estabilizadores importantes. A menudo se añade un término que contempla la acción del nitrógeno en la fórmula del  $Ni_{eq}$ , con un coeficiente de 30 determinado por DeLong. Esto ayuda a corregir la expresión original al tener en cuenta la fuerte influencia austenizante del nitrógeno.

Para el estudio de las nuevas fórmulas de predicción de FN en los aceros inoxidable dúplex se utilizó un programa aprobado por The Welding Research Council Subcommittee on The Welding of Stainless Steel.

Se considera en este estudio que las soldaduras con  $FN > 20$  están dentro de la composición de los aceros inoxidable dúplex, y el cálculo de FN y los coeficientes que acompañan a cada componente de la aleación, según el método propuesto por Kotecki, tiene significativas diferencias respecto de las fórmulas de Schaeffler. Así en los inoxidable dúplex:

1. El manganeso es un elemento estabilizador de la ferrita, de forma contraria a lo que sugiere Schaeffler.
2. El poder austenizante del nitrógeno se debe reflejar en la fórmula del  $Ni_{eq}$  con un coeficiente más próximo a 15 que al 30 hallado por DeLong.

**LINCOLN KD**

3. El coeficiente que evalúa el poder alfégeno del molibdeno es el mismo que el de Schaeffler.
4. El coeficiente del silicio es inferior a 1,5.
5. El titanio tiene un poder alfégeno o ferritizante muy fuerte.

La ecuación que se encontró para la predicción del número de ferrita de estos aceros inoxidable dúplex queda entonces:

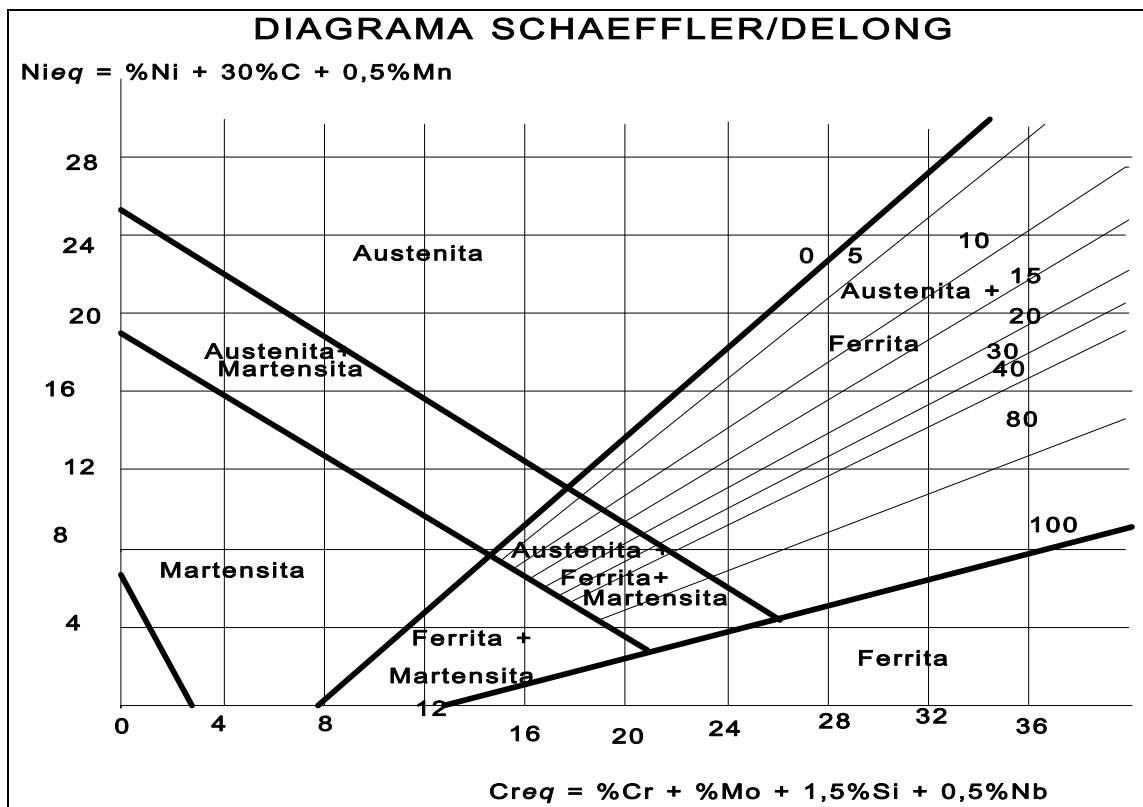
$$\text{FN} = -15 + 2,2 (\% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 15\% \text{Ti} + 0,8\% \text{Nb} + 0,5\% \text{Si}) - 1,9 (\% \text{Ni} + 17\% \text{N} + 30\% \text{C})$$

La precisión de esta ecuación es igual o superior a la del diagrama de DeLong:

- Para aceros inoxidable tipo AISI 308 y 316 la precisión es de  $\pm 3$  para el 95% de los casos, utilizando ambas expresiones.
- Para aceros inoxidable tipo AISI 309 la precisión del diagrama de DeLong es de  $\pm 3$  en sólo un 53% de los casos, mientras que la de Kotecki se cumple con dicha precisión para un 95% de los casos. Esto es debido a que los contenidos de nitrógeno y manganeso están fuera del rango recomendado por DeLong.
- En general, para todos los aceros inoxidable de la serie AISI 300, la ecuación de Kotecki predice con un error de  $\pm 2$  en un 75% de las soldaduras.
- En el caso de los aceros inoxidable dúplex, la ecuación de DeLong supera en mucho al error cometido al calcular FN en comparación con el de la ecuación de Kotecki.

*Nota: Existen limitaciones en la precisión de todos estos cálculos predictivos del FN. Debe siempre tenerse en cuenta, además de las composiciones químicas, las condiciones de temperatura: ciclos térmicos, parámetros de soldadura, condiciones superficiales, etc. Esto supone que se acepten discrepancias en la determinación del FN de  $\pm 10$  entre diferentes laboratorios.*

Como ejemplo se acompaña el diagrama de Schaeffler, uno de los más conocidos y utilizados para la predicción del FN de una soldadura. Para mayor precisión, sobre este diagrama, tener en cuenta las conclusiones anteriormente expuestas.



**SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES**

## LINCOLN KD

Por soldabilidad se entiende la facilidad con que un material puede ser fabricado por soldadura incluyendo la habilidad de la unión soldada para aguantar las tensiones y las condiciones a que se ve sometido en servicio, así como la medida de la facilidad o dificultad del material de mantener sus propiedades generales tras su soldadura.

La soldabilidad de los aceros inoxidable depende principalmente de la estructura metalográfica de los mismos. Así se considera que la soldabilidad general de todos los aceros pertenecientes a la familia de los inoxidables martensíticos es muy mala. La de los inoxidables endurecibles por precipitación es aceptable bajo el punto de vista del comportamiento del acero frente a la soldadura, pero en cambio, muy mala respecto a que, tras soldadura, la estructura metalográfica de este acero en las zonas de soldadura y próxima a éstas, cambian totalmente su estructura y por tanto, los beneficios que esta le otorga.

La soldabilidad de los inoxidables ferríticos es aceptable a mala según la composición de cada uno, su espesor, y sobre todo, de la aplicación de servicio que de él se pretenda, ya que la soldadura puede afectar muy negativamente las propiedades de estos aceros.

La soldabilidad, en cambio, de tanto los aceros inoxidables dúplex (sobre todo los de última generación) como de los austeníticos es muy buena, y esto hace que estas familias de aceros sean la elección más común cuando en el diseño del componente que se pretenda, la soldadura es un proceso de fabricación esencial o importante.

Se considera en este resumen, la soldabilidad de cada familia de aceros inoxidables frente a los procesos de soldadura al arco eléctrico, en particular: SMAW (Soldadura manual con electrodos recubiertos), GMAW (también conocido como MIG, Soldadura semiautomática o automatizada con alambre continuo macizo y gas de protección), FCAW (Soldadura semiautomática o automatizada con alambre continuo tubular y gas de protección), SAW (Soldadura por Arco Sumergido) y GTAW (también conocido como TIG, Soldadura manual o automatizada con electrodo no consumible de tungsteno o aleación de éste).

El empleo de uno u otro proceso de soldadura depende del tipo de acero inoxidable, el diseño de la estructura y sus dimensiones. Es aconsejable, para la elección del proceso más adecuado, completar esta información con las consideraciones para el cálculo de costes de cada proceso, en las que se tiene en cuenta, además del coste de los materiales que se emplean, fundamentalmente, el del tiempo necesario para realizar cada unión soldada así como la inversión necesaria del equipo de soldadura y su amortización en función del número de componentes a soldar.

## **1. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS**

**LINCOLN KD**

Los aceros inoxidable de estructura totalmente ferrítica tienen muy inferior soldabilidad a los aceros inoxidable austeníticos, y como consecuencia de ello, aunque estos aceros tienen una excelente resistencia a la corrosión y a corrosión bajo tensión en atmósferas de cloruros, son utilizados únicamente en aplicaciones específicas como, por ejemplo, intercambiadores de calor.

Uno de los principales problemas de soldabilidad asociado a estos aceros lo representa el excesivo crecimiento de grano que tiene lugar a altas temperaturas debido a las elevadas velocidades de difusión de la estructura cúbica centrada en el cuerpo de la ferrita. Como además, durante la solidificación y enfriamiento no tiene lugar ninguna transformación de fase, no hay oportunidad de afinamiento de grano y todo ello se traduce en una pérdida considerable de la tenacidad de estas aleaciones soldadas.

Otro problema que presentan los aceros inoxidable totalmente ferríticos es la reducida solubilidad que tienen elementos intersticiales en su estructura, lo cual da lugar segregaciones de los mismos en los límites de grano, y como consecuencia, a una pérdida de resistencia a la corrosión intercrystalina.

Finalmente, bajo condiciones adversas de soldadura, puede producirse una precipitación de fase intermetálica, con los consecuentes efectos de disminución de resistencia a la corrosión y tenacidad.

Para minimizar el crecimiento del tamaño de grano ferrítico es esencial aplicar un aporte térmico muy bajo durante la soldadura. El aporte térmico por unidad de longitud de soldadura realizada puede calcularse a partir de los parámetros de soldadura utilizados, como:

$$Q = (I \times V \times 60) / (v \times 1000)$$

donde :  
Q = Aporte Térmico (Heat Input) por unidad de longitud (KJ/mm)  
I = Intensidad de corriente (A)  
V = Voltaje de arco (V)  
v = Velocidad de soldadura (mm/min)

Aunque el factor que nos interesa es la proporción que de este aporte térmico recibe la pieza que se suelda, el cual depende del proceso de soldadura utilizado:

$$Q' = X \times Q$$

**LINCOLN KD**

donde:  $Q'$  = Energía transferida por unidad de longitud (KJ/mm)  
 $X$  = Factor que depende del proceso de soldadura empleado, ya que cada uno de ellos tiene una diferente velocidad de enfriamiento y penetración, y que está comprendido en los siguientes rangos:

Método de soldadura	X (aprox.)
SMAW	0,65-0,85
SAW	0,95-0,99
MIG/FCAW	0,60-0,70
TIG	0,25-0,50

De lo que se deduce que el método TIG es el que aporta un menor *Heat Input* a los materiales soldados.

Los principales problemas y soluciones de la soldadura de los aceros inoxidables ferríticos pueden resumirse:

**Problemas :**

- Crecimiento de grano en ZAT y cordón de soldadura.
- Reducción de tenacidad.
- Reducción de la resistencia a la corrosión por precipitación de fase o segregaciones en límite de grano.

**Precauciones:**

- Soldar con bajo aporte térmico. Emplear el proceso TIG en trabajos de mucha responsabilidad utilizando gases de protección adecuados, tanto en el cordón como en el contracordón (usar gases de purga).
- Extremar la limpieza y preparación de las piezas a soldar para evitar segregaciones.
- Procurar no utilizar la soldadura como proceso de fabricación de aceros inoxidables ferríticos de más de 5 mm de espesor. La soldadura en espesores mayores reduce considerablemente las propiedades de tenacidad y resistencia a la corrosión de estos aceros, y esto es muy difícilmente recuperable aún con tratamientos térmicos tras la soldadura (PWHT), ya que es realmente complicado reafinar una estructura de grano ferrítico grueso, por no decir impracticable.

**Consumibles para soldadura de aceros inoxidables ferríticos:**



SMAW	MIG	FCAW	SAW	Recomendable:
AROSTA 329 KD 410S KD 410 SNiMo KD 430S	KD 410  KD 430 Gas de protección: Ar/O <sub>2</sub> (2%) o Ar/CO <sub>2</sub> (2,5%)	OUTERSHIELD MC 409 LINCORE 410 LINCORE 410 NiMo	LINCORE 410 LINCORE 410NiMo LINCORE 420 LINCORE 423 L LINCORE 423Cr LINCORE 424A Y FLUXES 801/802/803	Soldar con consumibles austeníticos tipo 309L para medios medianamente oxidantes o tipo 904L para medios altamente corrosivos de sulfuros, siempre que sea posible.

## 2. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Antes de hablar de soldabilidad, conviene tener en cuenta algunas propiedades de los aceros inoxidable austeníticos, las cuales afectan también indirectamente a la soldabilidad de estos aceros:

Los aceros inoxidable austeníticos tienen un elevado coeficiente de expansión térmica y una baja conductividad térmica respecto a los aceros ferríticos, con lo que se produce al soldarlos mayor tensión residual, acumulación de calor en las zonas de uniones soldadas y mayor deformación de las piezas. Esto es de importante consideración a la hora de diseñar una correcta secuencia de soldadura con la que se debe pretender disminuir al mínimo estos efectos que, de lo contrario, podrían resultar perjudiciales o representar graves contratiempos.

En cuanto a los problemas posibles relacionados con efectos de precipitación y segregaciones químicas producidas durante la soldadura, estos pueden minimizarse con el control de la metalurgia del metal base, la práctica de la soldadura y la selección de los consumibles adecuados.

Los principales precipitados que aparecen en la soldadura de inoxidable austeníticos son: ferrita- $\delta$ , fase  $\sigma$ , y carburos  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$ . La fase  $\sigma$  se usa para describir una gama de precipitados ricos en cromo y molibdeno, que pueden precipitar directamente en el depósito de soldadura, pero que se forman preferencialmente desde la ferrita- $\delta$  en los aceros que contienen molibdeno. Esta ferrita- $\delta$  se transforma a fases intermetálicas, como  $\sigma$  y  $\chi$  a temperaturas entre 500 y 850°C para la fase  $\sigma$  y de 650 a 950°C para la fase  $\chi$ . La proporción

**LINCOLN KD**

de precipitación de estas fases aumenta con el contenido de cromo y molibdeno, y reducen considerablemente la tenacidad, ductilidad y resistencia a corrosión de estos aceros. Por este motivo, el consumible del tipo AWS 316 se formula con mayor contenido de cromo y menor de molibdeno respecto del material base, con el objeto de minimizar la aparición de fase .

- 23 -

La precipitación de carburos del tipo  $M_{23}C_6$  y  $M_6C$  no suele ser un problema en el depósito de soldadura, debido a que los consumibles tienen, por lo general, un bajo contenido de carbono, o bien están estabilizados en los grados AISI 321 y 347; pero en cambio, esta precipitación produce un fenómeno bien conocido de corrosión en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) por la soldadura. Lógicamente, cuanto más aporte térmico produzca el procedimiento escogido y cuanto mayor contenido en carbono tenga el metal base, más apreciable será este fenómeno. No se observan problemas de corrosión en la ZAT cuando el material base tiene los siguientes contenidos de carbono, dependiendo de su espesor:

Hasta	1 mm	0,10% C
de 1 a 3 mm		0,08% C
de 3 a 12 mm		0,06% C
de 12 a 19 mm		0,05% C
de 19 a 25 mm		0,05% C
más de	25 mm	0,03% C

O bien, en caso de emplearse aceros con contenidos de carbono superiores, debe realizarse un post-tratamiento de soldadura para redisolución de carburos y recuperar así la resistencia a la corrosión de la pieza soldada.

A veces, estos defectos de precipitación pueden no afectar sensiblemente las propiedades mecánicas del material soldado, aunque si se dieran en gran extensión, dependiendo de las condiciones de servicio del material (temperatura y medio), hay probabilidades de fallos catastróficos del mismo. Además, si este defecto se diera en pequeña extensión, pero de forma apreciable, puede verse afectada la resistencia a la corrosión del material, ya que cada defecto es un posible foco de iniciación de picaduras u otros tipos de corrosión.

Otro problema asociado a la soldadura de aceros inoxidable totalmente austeníticos son las segregaciones químicas de bajo punto de fusión en borde de grano, y mayoritariamente en el centro de los cordones pueden crear una pérdida de ductilidad del material en esas áreas, que se traduce en fisuración "en caliente", sobre todo en los aceros totalmente austeníticos (como es el caso del AISI 310). Para evitar este fenómeno, los consumibles de soldadura están calculados con composición química tal que el depósito contenga un cierto porcentaje de fase ferrita- , que proporciona mayor resistencia mecánica y evita este tipo de fisuración "en

## LINCOLN KD

caliente". En los casos en que se requiera una mayor proporción de esta fase, es esencial cuidar el aporte de nitrógeno en los procesos de arco eléctrico abierto, pues éste es un elemento estabilizador de la fase austenítica.

Los principales problemas y soluciones de la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos pueden resumirse:

### Problemas :

- Aparición de fases intermetálicas frágiles desarrolladas a partir de la fase ferrita- .
- Aparición de precipitados de carburos que pueden dar problemas de pérdida de resistencia a corrosión (especialmente por picaduras).
- Aparición de segregaciones en el centro de los cordones de soldadura, que pueden dar lugar a "fisuración en caliente"
- Excesiva acumulación de calor en las zonas soldadas, lo cual aumenta la producción de cada uno de los defectos anteriores además de provocar mayor distorsión en los materiales que se sueldan.

### Soluciones:

- Controlar la cantidad de calor durante la soldadura (limitar el aporte térmico a 2,5 KJ/mm) y la temperatura de servicio del material, de forma que no esté expuesto durante prolongados períodos de tiempo a las temperaturas de fragilización (500 a 950°C). Este requisito es más importante cuanto la cantidad de fase ferrita- es mayor tanto en el metal depositado como en el material base (esta cantidad se puede predecir según los diagramas y fórmulas comentados anteriormente). Se debe tener en cuenta que una cierta cantidad de esta fase ferrita- es beneficiosa e incluso imprescindible en ciertos tipos de aceros para evitar el defecto de fisuración en caliente por segregaciones de bajo punto de fusión.
- Controlar la cantidad de carbono, principalmente del material base que se escoja (según recomendaciones anteriores en función de su espesor), ya que, normalmente los consumibles de soldadura son de muy bajo contenido de carbono. Otra opción es utilizar aceros inoxidable estabilizados con titanio o niobio. En este caso, los

## LINCOLN KD

consumibles a utilizar pueden ser o bien de bajo carbono o estabilizados con niobio (el titanio se oxida y pierde en forma de escoria durante la soldadura), con el resto de composición química de acuerdo con el material base que se suelda o sobrealeado.

-Soldar sin precalentar los aceros inoxidable austeníticos, con cordones de soldadura estrechos, limitando la acumulación de calor y el tiempo de exposición a altas temperaturas. Realizar secuencias de soldadura lógicas, repartiendo las tensiones y el calor aportado en toda la pieza para no exponer ningún cordón a excesiva sollicitación de tensiones. Limitar la temperatura entre pasadas y del material base a un máximo de 150°C. Esperar hasta su enfriamiento antes de seguir soldando. Estas últimas precauciones favorecerán también la limitación en deformaciones y la excesiva concentración de tensiones que pudieran producirse.

### Consumibles para soldadura de aceros inoxidable austeníticos

Material base	SMAW	MIG	FCAW	TIG	SAW
304/321/347	LIMAROSTA 304L AROSTA 347 AROSTA 304 H	LNM 304 L LNM 347 Si	COR-A-ROSTA 304L BLUE-MAX 304L	LNT 304L LNT 347Si	LNS 304L LNS 347 Flux P2000 / ST-100
316/316LN/316Ti Anteriores	LIMAROSTA 316L AROSTA 318	LNM 316L	COR-A-ROSTA 316L BLUE-MAX 316L	LNT 316L	LNS 316L LNS 318 Flux P2000 / ST-100
317LN / Anteriores	AROSTA 4439 JUNGO 4439	LNM 4439Mn LNM 4455	...	LNT 4439 Mn LNT 4455	LNS 4439Mn Flux P2000 / ST-100
304LN/310S	JUNGO 4465	...	...	...	LNS 4465 Flux P2000 / ST-100
904L	JUNGO 4500	LNM 4500	...	LNT 4500	LNS 4500 Flux P2000 / ST-100
254SMo/904hMo	NICRO 42/25	LNM 42/25	...	LNT 42/25	...
307/ Aceros al Mn	KD 19.9.6S	LNM 307	...	...	LINCORE M Flux 801/802/803
310S /CK20/HK40	INTHERMA 310	LNM 310	...	...	...

## LINCOLN KD

Soldaduras heterogéneas inox-AceroC y baja aleación	LIMAROSTA 309S AROSTA 309Nb AROSTA 309Mo NICHROMA	LNM 309LSi LNM 309 LHF	COR-A-ROSTA 309L COR-A-ROSTA 309LMo BLUE-MAX 309L BLUE-MAX 309LMo	LNT 309 LHF	LNS 309L Flux P2000 / ST-100
Soldaduras de aceros difíciles y de alto límite elástico	LIMAROSTA 312	...	...	...	...

### 3. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

El elevado contenido de cromo y la presencia de nitrógeno y molibdeno en muchos de estos aceros, les dota de una excelente resistencia a la corrosión generalizada y por picaduras. Sin embargo, a través de su soldadura pueden introducirse problemas de corrosión tanto en el metal aportado como en el metal base afectado por dicha soldadura. Esto es así, sobre todo en los aceros producidos sin un excelente control tanto de la composición química como de los tratamientos térmicos y de hechurado de dichos aceros. La elección del fabricante y del acero es cada vez de mayor importancia a la hora de obtener un componente soldado y/o tratado que mantenga tantas sus propiedades mecánicas como de resistencia a la corrosión tras el proceso de fabricación del mismo.

La aplicación de acero inoxidable dúplex tiene muchas ventajas sobre por ejemplo el AISI 316LN o 317LN en aplicaciones de ambientes altamente corrosivos, especialmente en atmósferas de cloruros. Debido a los altos límites elásticos de estos aceros ( $>450 \text{ N/mm}^2$ ), el espesor de las chapas se puede reducir considerablemente comparado con los tanques hechos de aceros más convencionales. Además, el acero inoxidable dúplex ofrece una mejor resistencia a la corrosión por picaduras y fisuración bajo tensiones comparado con los inoxidables austeníticos. La ventaja sobre los aceros inoxidables ferríticos es la superior soldabilidad y mayor tenacidad de impacto.

Para comprender los diferentes problemas que puedan derivarse de la soldadura de un acero inoxidable dúplex (y, por tanto las precauciones a tomar para eliminarlos o minimizarlos), es necesario tratar del proceso de solidificación y enfriamiento del mismo y las transformaciones que durante estos procesos se producen.

Durante el enfriamiento desde el estado líquido, el acero inoxidable dúplex solidifica como

## LINCOLN KD

aleación monofásica ferrítica- , antes de que una porción de dicha fase se transforme a estructura austenítica. Al mismo tiempo, en la ZAT, donde no se llegan a alcanzar temperaturas de fusión, sí se llega a producir transformación del material que puede llegar a ser totalmente ferrítico, por lo que es susceptible de crecimiento de grano, de forma similar a lo que sucede a los aceros inoxidable ferríticos. No obstante, a diferencia de estos últimos, en la ZAT sí se produce retransformación de la fase ferrítica- a austenítica durante el enfriamiento, que viene acompañada de afinamiento de grano. Este fenómeno, como se comprende, depende en gran medida de la extensión y de la proporción de retransformación, y se da el caso de que, a veces, bajo condiciones de soldadura desfavorables, tanto la tenacidad como la resistencia a la corrosión de estos aceros puede verse afectada debido a que el contenido final de ferrita- que se obtiene es demasiado elevado. En estos casos extremos se ha observado que estos fenómenos tienen lugar:

- a) Cuando la velocidad de enfriamiento es demasiado elevada, como sucede, por ejemplo, en soldaduras mediante la técnica de Haz electrónico, con la que no se da tiempo suficiente a la transformación austenítica.
- b) Cuando el aporte térmico es demasiado bajo, ya que se obtiene también una ZAT de granos predominantemente ferríticos que no han tenido tiempo de transformarse.

Uno de los mecanismos propuestos para explicar la corrosión que tiene lugar en estos aceros soldados es la producción de precipitados de nitruro de cromo en puntos localizados. Con enfriamientos relativamente lentos de las soldaduras, no sólo se consigue una mayor proporción de transformación austenítica en la ZAT y el cordón, sino que se proporciona el tiempo suficiente para recocido y difusión de elementos y compuestos precipitados, con lo que se puede obtener una estructura mucho más homogénea y se conserva la resistencia a la corrosión del acero inoxidable dúplex que se soldó.

Respecto a la susceptibilidad a la rotura por corrosión bajo tensión en ambientes de cloruros (SCC), se han llevado a cabo estudios en los que se demuestra que, aún trabajando con niveles de tensión elevados (80% del límite elástico del material), los fallos que tienen lugar en inoxidable dúplex soldados son aproximadamente los mismos que los que se producen en los metales base, por lo que los ciclos de soldadura prácticamente no afectan la resistencia de dichos materiales a este tipo de corrosión.

Los problemas asociados con el alto contenido de ferrita que se puede encontrar en aceros dúplex soldados con solidificaciones y enfriamientos rápidos, pueden llegar a ser solucionados mediante el control de la composición de los consumibles empleados en la soldadura. Así, es

## LINCOLN KD

común utilizar consumibles sobrealeados en níquel (3-4%), que ayuda a la transformación austenítica para obtener una relación %ferrita/%austenita similar a la del metal base. En aceros con pobre control de la composición química y laminación, para obtener una estructura también proporcionada en la ZAT, se deja demasiada responsabilidad al procedimiento de soldadura empleado, y sobre todo a la velocidad de enfriamiento, y, a veces, es imposible determinar si el porcentaje final de austenita será o no suficiente en esta zona. -en cambio, en aceros producidos con buen control de estos parámetros, el contenido en nitrógeno de los mismos, uniformemente distribuido, ayuda también a la transformación austenítica, con los que debe obtener una ZAT de propiedades, características estructurales y resistencia a la corrosión también equivalente al cordón y el material base.

El contenido de ferrita óptimo para que resulten buenas propiedades, especialmente ductilidad y tenacidad, así como resistencia a la corrosión, no debería superar el 60%.

### Consumibles para la soldadura de aceros inoxidables dúplex:

Material base	SMAW	MIG	FCAW	TIG	SAW
2205	AROSTA 4462	LNM 4462	COR-A-ROSTA 4462 BLUE-MAX 4462	LNT 4462	LNS 4462 Flux P2000 / ST-100
2205 ZERON 100 CD-4MCu	JUNGO ZERON 100X	LNM ZERON 100X	...	LNT ZERON 100X	LNS ZERON 100X LNS ZERON 100M Flux P2000 / ST-100

## CONSEJOS PRÁCTICOS PARA LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES

- Tratar de encontrar un suministrador de acero capaz de proveer la mayor gama de tamaños de chapa, para evitar cortes y uniones al máximo.
- Los contenidos de azufre, oxígeno, silicio, cobre y nitrógeno (en los aceros con esta adición), debería estar muy bien controlado para obtener una buena soldabilidad, y evitar fisuración en caliente o durante conformados tras soldadura.
- Retirar las superficies dañadas, sucias o rascadas utilizando un cepillado o amolado adecuados. No sobrecalentar nunca la superficie en este proceso de limpieza.
- Limpiar cuidadosamente todos los restos de pasivante/decapante que se haya utilizado con agua dulce.
- Dar al acero la posibilidad de reproducir sus propiedades de inoxidable dejando las superficies expuestas al aire o a un medio oxidante: p.ej. almacenar las chapas en posición vertical.
- Prevenir la contaminación con otros metales: no usar cepillos, piquetas de acero al carbono, sino de acero inoxidable, y no mezclar las herramientas para diferentes tipos de aceros.
- Retirar pinturas, suciedad y escorias de soldadura.
- Retirar los colores que indiquen sobrecalentamientos para asegurar que se dan los mínimos posibles, con amolado.
- Realizar el tratamiento final después de la soldadura (chorreado o decapado/pasivado) sólo cuando ya no sea necesario hacer nada más con el componente fabricado y éste esté listo para su aplicación de servicio.
- Considerar ya en el diseño del componente cuáles son los procedimientos de soldadura más adecuados y económicos.
- Utilizar consumibles que den la apariencia más suave y las menos o nulas proyecciones (y/o los equipos de soldadura que también puedan conseguirlo).
- Utilizar los procesos y procedimientos de soldadura que den las mínimas deformaciones.
- Si es posible la soldadura por dos caras, evitar la soldadura multipasadas.



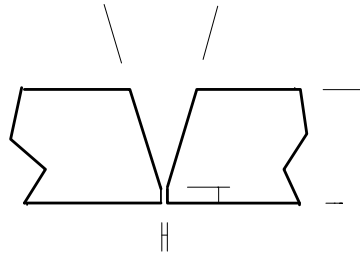
## LINCOLN KD

- Aumentar al máximo la velocidad de soldadura para limitar la deformación y encogimiento de las chapas.
- Hacer puntos de soldadura más largos y con mayor separación de raíz debido al alto coeficiente de expansión del acero.
- Los electrodos recubiertos tipo rutilo-básico (clasificación AWS E:XXX-16) tienen las siguientes ventajas sobre los básicos (clasificación AWS E:XXX-15):
  - \* Menor contenido de carbono (mejor resistencia a la corrosión)
  - \* Apariencia de los cordones más suave (menos área de contacto)
  - \* Buena eliminación de escoria (menos residuos y soldadura más rápida y eficaz)
  - \* Menos proyecciones (soldadura más eficiente - menos sensitivo a picaduras)
  - \* Más fáciles de soldar.
- Usar volúmenes de soldadura lo más pequeños posible.

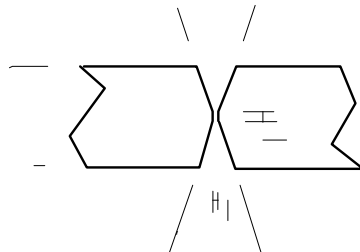
## LINCOLN KD

- El diseño y la selección de los tipos de preparaciones de junta y consumibles es crucial. Se indican a continuación algunas preparaciones para soldadura con diferentes procesos:

Espesor material (mm)	Bisel	Método Soldadura	(mm)	(mm)	(mm)
-----------------------	-------	------------------	------	------	------



< 3	no	SMAW	1-2	-	-
< 3	no	TIG	1-2	-	-
< 3	no	MIG	1-2	-	-
4-12	V	SMAW	1-3	50°	0-2
2,5-8	V	TIG	0-1	60°	0-2
3-10	V	MIG	0-2	50°	0-2
12	U	SMAW	1-3	30°	2-3
6	U	TIG	0-2	30°	1-3
8	U	MIG	0-2	30°	1-3



3-5	no	SMAW	1-2	-	-
3-5	no	TIG	1-2	-	-
3-6	no	MIG	1-2	-	-
5-8	no	SAW	0	-	-
> 10	X	SMAW,MIG,SAW	0-3	>50°	0-3
> 25	Doble U	SMAW,MIG,SAW	0-3	20° (radio 8mm)	1-3

## LINCOLN KD

- Se debe realizar un buen programa de entrenamiento de los soldadores (incluidos los de punteo), y, en general, de las personas que manipulen el acero inoxidable durante la fabricación del componente.
- Asegurar una buena penetración, usando backing o con gases de purga, o bien limpiar la raíz perfectamente asegurándose que no queden mordeduras.
- Trabajar limpio, evitar daños y contaminaciones y dar al acero inoxidable el tratamiento final de chorreado o bien decapado/pasivado.
- Trabajar junto a los suministradores de consumibles de soldadura con años de experiencia en este tipo de soldaduras.

### **AGRADECIMIENTO:**

A todos los clientes y colaboradores de LINCOLN KD, S.A., con los que aumentamos nuestra experiencia día a día y nos dan la oportunidad de mejorar tanto en nuestros productos como en los consejos para utilizarlos obteniendo los más óptimos resultados.

LINCOLN KD

