



# Soldabilidad de los aceros inoxidable

**Los aceros inoxidables constituyen una clase importante de las aleaciones ingenieriles, y se emplean tanto en estado laminado como de fundición, en un amplio rango de aplicaciones y sometido a los más variados medios.**

**Se utilizan extensivamente en las industrias de generación de energía, de la pulpa y el papel, así como en la industria de procesos químicos; además, en innumerables aplicaciones en productos comerciales y de uso diario.**

**El amplio uso de estos aceros y su importancia en tecnologías industriales críticas hace extremadamente importante el estudio de su soldabilidad y las formas óptimas de ejecutar su soldadura, para las más variadas condiciones de explotación.**



## Concepto de 'acero inoxidable'

Los aceros inoxidables son aleaciones base hierro que contienen un mínimo de 10,5% de Cr. Precisamente es este contenido de cromo el que le garantiza su carácter "inoxidable", a través de la formación de una fina y densa película superficial de óxido de cromo. La adición de otros elementos como *Ni*, *Mo*, *Cu*, *Ti*, *Al*, *Si*, *Nb*, *S* y *Se* busca mejorar determinadas características. Pocos aceros inoxidables contienen más de 30% de Cr o menos de 50% de Fe. El contenido de carbono oscila desde menos de 0,03 hasta más de 1,0% en ciertos tipos martensíticos.

## ACEROS INOXIDABLES

### CLASIFICACIÓN AISI



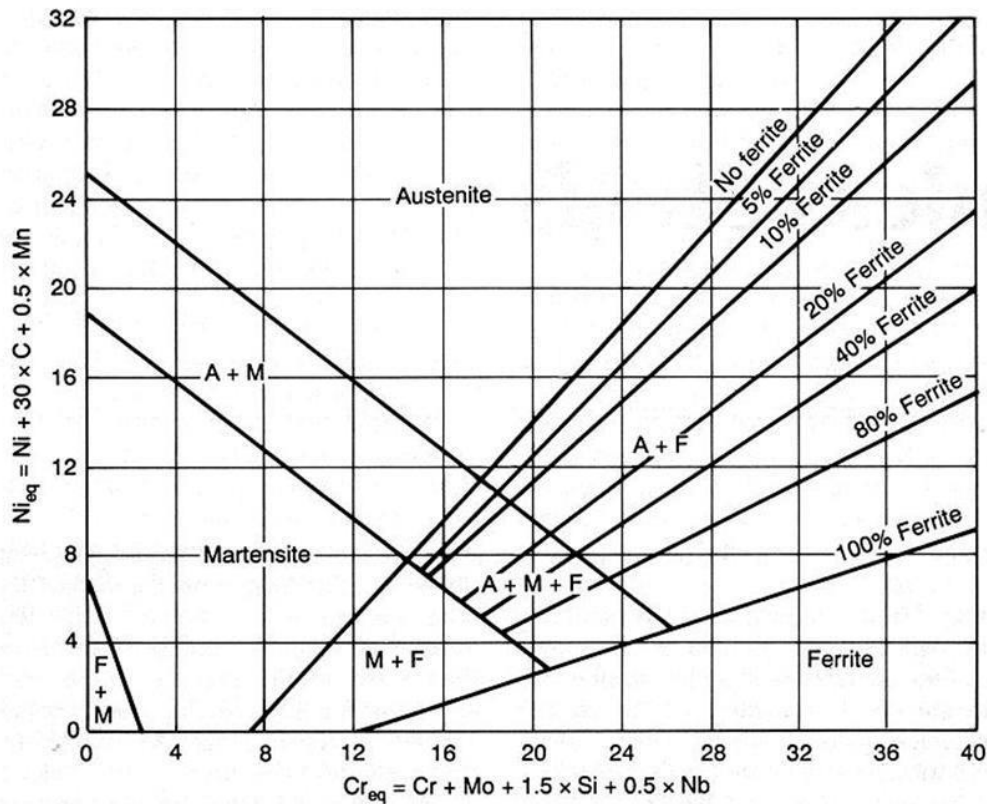
Esta clasificación viene dada por la estructura metalográfica del acero, la cual se establece en dependencia de la composición química que presente. En una figura siguiente puede observarse el *Diagrama de Shaeffler*, el cual describe la relación entre estructura y composición química para estos aceros, basados en los conceptos de *níquel equivalente* y *cromo equivalente*.

Estos no son más que índices que cuantifican el contenido de elementos aleantes ganmágenos (níquel equivalente); es decir, que estabilizan la fase austenítica en el acero y el contenido de elementos alfégenos (cromo equivalente), que son los que contribuyen a estabilizar la fase ferrítica. Estos aceros presentan valores en algunas de sus propiedades físicas que actúan en detrimento de su soldabilidad, por ejemplo, presentan una conductividad térmica sumamente baja, y en el caso de los austeníticos, estos presentan un elevado coeficiente de expansión térmica, por lo cual va a incrementarse el nivel de tensionamiento y distorsión en la unión soldada, lo cual contribuye grandemente a incrementar la susceptibilidad al agrietamiento en caliente.

## Propiedades físicas de los aceros inoxidable

Número AISI-SAE de aleación	Composición química, % en peso	Tratamiento	Resistencia a la tensión, MPa	Límite elástico, MPa	Alargamiento, %	Aplicaciones típicas
<b>Aceros inoxidable ferríticos</b>						
430	17Cr, 0,012C	Recocido	517	345	25	Aplicaciones generales, no endurecible; usos: vehículos, equipamiento de restaurantes
446	25Cr, 0,20C	Recocido	552	345	20	Aplicaciones a alta temperatura, calentadores.
<b>Aceros inoxidable martensíticos</b>						
410	12,5Cr, 0,15C	Recocido	517	276	30	Temperables de uso general; piezas de máquinas, válvulas.
440*	17Cr, 0,70C	Recocido Temp. y rev-	724 1828	414 1690	20 5	Cuchillería, cojinetes, herramientas quirúrgicas.
440C	17Cr, 1,1C	Recocido Temp. y rev-	759 1966	276 1897	13 2	Balas, cojinetes, anillos-guía, piezas de válvulas
<b>Aceros inoxidable austeníticos</b>						
301	17Cr, 7Ni	Recocido	759	276	60	Aleación de alto grado de endurecimiento por acritud.
304	19Cr, 10Ni	Recocido	580	290	55	Equipamiento químico y de procesado de alimentos.
304L	19Cr, 10Ni, 0,03C	Recocido	559	269	55	Bajo carbono para soldadura, depósitos químicos.
321	18Cr, 10Ni, Ti=5x%C min	Recocido	621	241	45	Aceros estabilizados para soldaduras; equipos de fabricación de vasijas a presión.
347	18Cr, 10Ni, Nb=10x%Cmin	Recocido	655	276	45	Aceros estabilizados para soldaduras; vagones cisterna para productos químicos.
<b>Aceros inoxidable endurecidos por precipitación</b>						
17-4PH	16Cr, 4Ni, 4Cu, 0,03Nb	Endurecidos precipitación	1311	1207	14	Engranajes, levas, ejes, piezas de turbinas y aeronaves.

Tomado de: [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/pfcm13\\_2\\_5.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/pfcm13_2_5.html)



Tomado de: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Diagrama-de-Schaeffler-mostrando-o-ponto-no-qual-se-encontra-o-aco-AISI-409-no\\_fig22\\_261215490](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Diagrama-de-Schaeffler-mostrando-o-ponto-no-qual-se-encontra-o-aco-AISI-409-no_fig22_261215490)

## Soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos contienen de 16 a 26% de Cr, entre 10 y 24% de Ni + Mn, hasta 0,40% de C y pequeñas cantidades de otros pocos elementos como Mo, Ti, Nb y Ta.

El balance entre Cr y Ni + Mn normalmente se ajusta para garantizar una microestructura de 90-100% de austenita. Estos aceros se caracterizan por presentar buena resistencia y elevada tenacidad en un amplio rango de temperaturas, así como buena resistencia a la oxidación a temperaturas por encima de los 538 °C.

En general, los aceros inoxidables austeníticos presentan una soldabilidad más satisfactoria que los ferríticos y martensíticos, con uniones de gran tenacidad, aunque no se aplique tratamiento térmico después de la soldadura.

### Composiciones típicas de los aceros inoxidables austeníticos

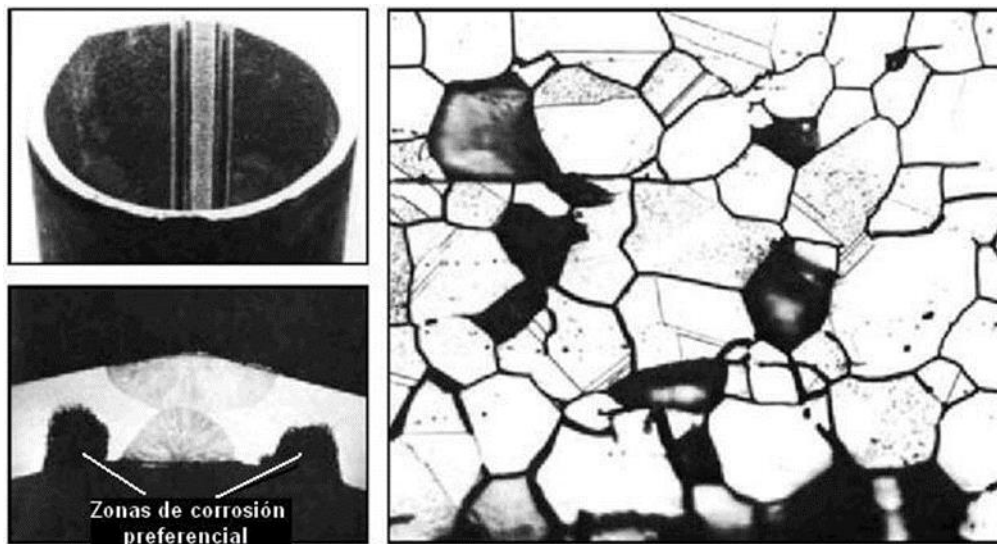
Tipo AISI	Composición química %			
	Carbono	Cromo	Níquel	Otros
201	0.15	16-18	3.5-5.5	0.25N; 5.5-7.5Mn y 0.06 P
202	0.15	17-19	4-6	0.25N; 7.5-10Mn y 0.06 P
301	0.15	16-18	6-8	
302	0.15	17-19	8-10	
302B	0.15	17-19	8-10	2-3 Si
303	0.15	17-19	8-10	0.2 P; 0.15 S(min); 0.6 Mo (opt)
303Se	0.15	17-19	8-10	0.2 P; 0.06 S; 0.15 Se
304	0.08	18-20	8-12	
304L	0.03	18-20	8-12	
305	0.12	17-19	10-13	
308	0.08	19-21	10-12	
309	0.2	22-24	12-15	
309S	0.08	22-24	12-15	
310	0.25	24-26	19-22	1.5 Si
310S	0.08	24-26	19-22	1.5 Si
314	0.25	23-26	19-22	1.5-3 Si
316	0.08	16-18	10-14	2-3 Mo
316L	0.03	16-18	10-14	2-3 Mo
316N	0.08	16-18	10-14	1 Si; 2 Mn; 2-3 Mo; 0.1-0.16 N
317	0.08	18-20	11-15	3-4 Mo
317L	0.03	18-20	11-15	3-4 Mo
321	0.08	17-19	9-12	Ti (5%Cmin)
329	0.1	25-30	3-6	1-2 Mo
330	0.08	17-20	34-37	0.75-1.5 Si; 0.04P
347	0.08	17-19	9-13	Nb+Ta (10%Cmin)
347M	0.03	19	10	Nb (13%Cmax)
348	0.08	17-19	9-13	Nb+Ta (10%Cmix pero 0.1 Ta max);0.2Co

### Principales problemas de soldabilidad de los aceros austeníticos:

- "Sensibilización" de la zona afectada por el calor (ZAC), lo cual provoca la corrosión intercrystalina en servicio y la pérdida de ductilidad de la unión.
- Fisuración en caliente
- Precipitación de fase (provoca fragilidad en la unión)
- Gran riesgo de distorsiones residuales

## Sensibilización:

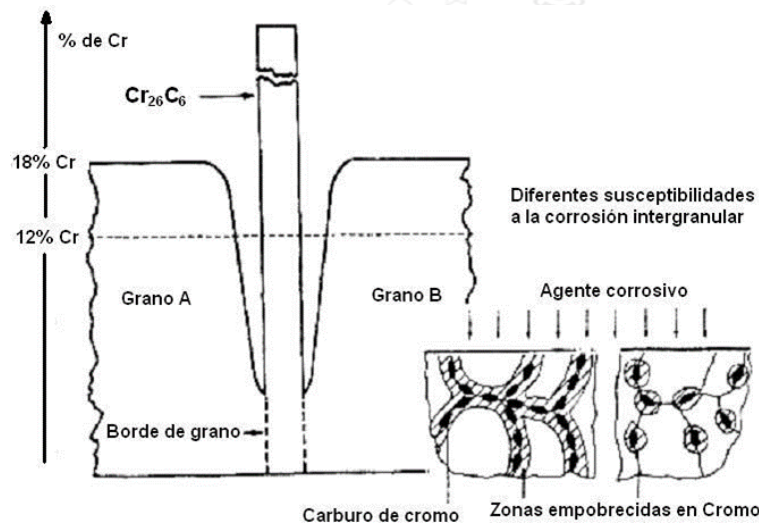
Un problema esencial en la soldadura de estos aceros lo constituye la "sensibilización" de la unión, lo cual provoca la pérdida de ductilidad en la misma y la corrosión intercrystalina durante el servicio.



Fuente: "AWS Welding Handbook".

Dicho fenómeno es causado por la precipitación de carburos de Cr en las fronteras de grano de la zona afectada por el calor (ZAC) que alcanza durante la soldadura valores de temperatura en el rango de 427 – 871 °C, reduciéndose la concentración de Cr en solución en las zonas cercanas a dichas fronteras, y debilitándose la resistencia a la corrosión de estas áreas.

La costura y el metal base más próximo sufren un recocido producto del propio ciclo térmico de soldadura disolviendo los carburos precipitados, por lo cual solo una estrecha franja de 3-5 mm dentro de la ZAC es la que presenta corrosión intercrystalina.



Tomado de: [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12\\_4\\_5.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_4_5.html)

## Soluciones al fenómeno de la sensibilización:

- Empleando metales base y de aporte con bajos contenidos de carbono, lo cual reduce la cantidad de carbono disponible para la reacción con el Cr.
- Las soldaduras se realizarán sin precalentamiento y garantizando una mínima entrada de calor a la pieza, de forma que la ZAC permanezca el menor tiempo posible en el intervalo de temperaturas de sensibilización.
- Utilizar metales base y de aporte estabilizados, los cuales contienen elementos más afines por el carbono que el Cr, lo cual garantiza que este permanezca en solución. Los aceros del tipo 321 se estabilizan con titanio, mientras los del tipo 347 con niobio y tántalo.

## Agrietamiento en caliente

El agrietamiento en caliente es causado por compuestos de bajo punto de fusión, tales como sulfuros y fosfuros metálicos que se sitúan en las fronteras de grano, de la costura y/o ZAC, provocando baja ductilidad del metal a alta temperatura (por baja coherencia intergranular), lo que junto a las tensiones de tracción que se desarrollan durante el enfriamiento provocan las micro fisuras.



## Soluciones al agrietamiento en caliente

Este tipo de agrietamiento puede ser prevenido ajustando la composición de los materiales base y de aporte, para obtener en la costura una microestructura con un pequeño contenido de ferrita en la matriz austenítica (de 3-15%).

Este contenido de ferrita garantiza una frontera de grano ferrítico – austenítica capaz de disolver las impurezas, no permitiendo la fisuración. El contenido de ferrita no debe ser mucho mayor del necesario para prevenir la fisuración, ya que un exceso puede afectar la resistencia a la corrosión, la ductilidad y la tenacidad de la unión.

Otra solución se consigue reduciendo compuestos residuales como boro, fósforo, azufre, selenio, silicio, niobio y tántalo hasta niveles mínimos (esto puede incrementar considerablemente el costo del acero).

## Precipitación de fase

Este es un fenómeno que fundamentalmente se presenta durante el servicio de las uniones a altas temperaturas. No obstante, durante los procesos de soldadura, cuando el metal se calienta en el dominio de temperaturas de 600 a 800 °C, pueden presentarse las condiciones para la aparición de fase, la cual es considerablemente más dura que la ferrita inicial, provocando fragilidad en la unión, acompañada de una disminución de la ductilidad, la tenacidad y la resistencia a la corrosión.

Este fenómeno depende del tiempo de permanencia a esta temperatura. La fragilización resulta limitada cuando el contenido de fase es pequeño (de 2 a 3%), y no afecta el retículo del grano, mientras que cae rápidamente cuando el contenido de ferrita sobrepasa el 12%.

El tratamiento térmico post-soldadura en este rango de temperaturas puede provocar también este fenómeno. Se ha demostrado que los aceros 25Cr-20Ni (310) y 23Cr-13Ni (309) pueden sufrir una apreciable pérdida de ductilidad cuando se les realiza un tratamiento de alivio de tensiones a una temperatura de 850 °C.

### **Medidas de prevención:**

- No sobrecalentar el metal durante la soldadura.

### **Distorsiones residuales**

Los aceros austeníticos presentan un coeficiente de expansión térmica de un 50% mayor que los aceros al carbono, o los inoxidables de la serie 400, lo cual puede ser causa de mayores distorsiones residuales de soldadura.

Es por esto que, durante la soldadura de estos aceros, se deben tomar siempre precauciones que minimicen los esfuerzos residuales de soldadura (y, por lo tanto, las distorsiones), entre los cuales se pueden enumerar:

- Empleo de dispositivos de fijación
- Diseño de uniones y secuencia de soldadura adecuados
- Empleo de bajo aporte térmico, realizando cordones estrechos y no con oscilación, empleando procesos como GTAW o GMAW con arco pulsado, etc.
- Predeformación de las piezas
- Empleo de corrección o enderezado mecánico posterior

El contenido de ferrita en el metal depositado por soldadura puede ser predicho con el uso de diagramas de constitución.

El más viejo de estos diagramas es el de Shaeffler, realizado en 1948, el cual interrelaciona la composición química del metal con la estructura metalográfica, y posee una importancia vital en la determinación de las condiciones de soldabilidad de los materiales estudiados.

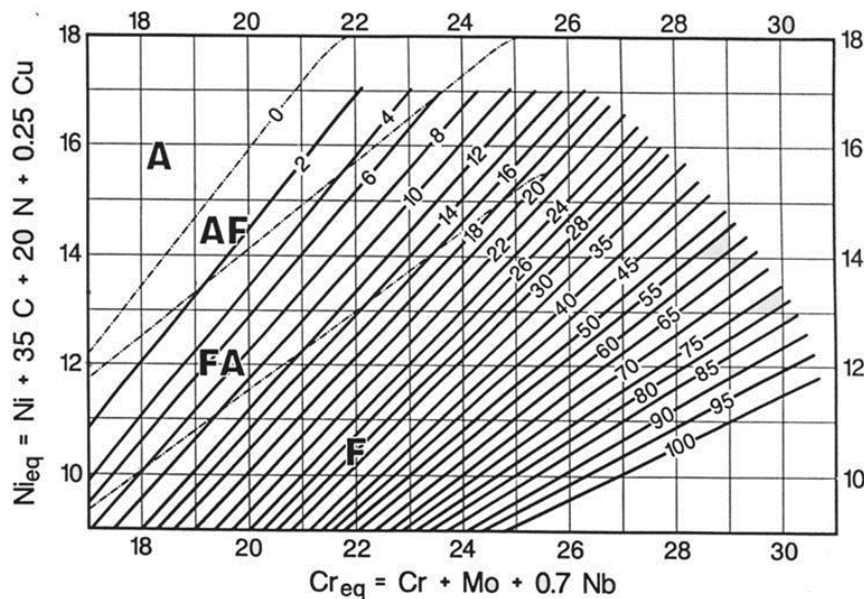
Esta interrelación agrupa a los elementos de aleación en dos grandes grupos: los que favorecen la formación de la fase ferrítica (alfágenos), y los que favorecen la formación de la fase austenítica (ganmágenos).

El *Diagrama de Shaeffler*, a pesar de su largo uso, es hoy anticuado por no considerar el efecto del nitrógeno y por la falta de exactitud del porcentaje de ferrita del metal depositado entre los ajustes dados por el mismo.

Una mejora del *Diagrama de Shaeffler* lo constituye el *Diagrama de DeLong*, de 1973, con el uso de la estimación del nivel de ferrita a través del "Número de Ferrita".

Sin embargo, la mayor diferencia la constituye la incorporación del nitrógeno en la expresión del Ni equivalente.

*Diagrama WRC* para la determinación de la estructura en aceros inoxidables.

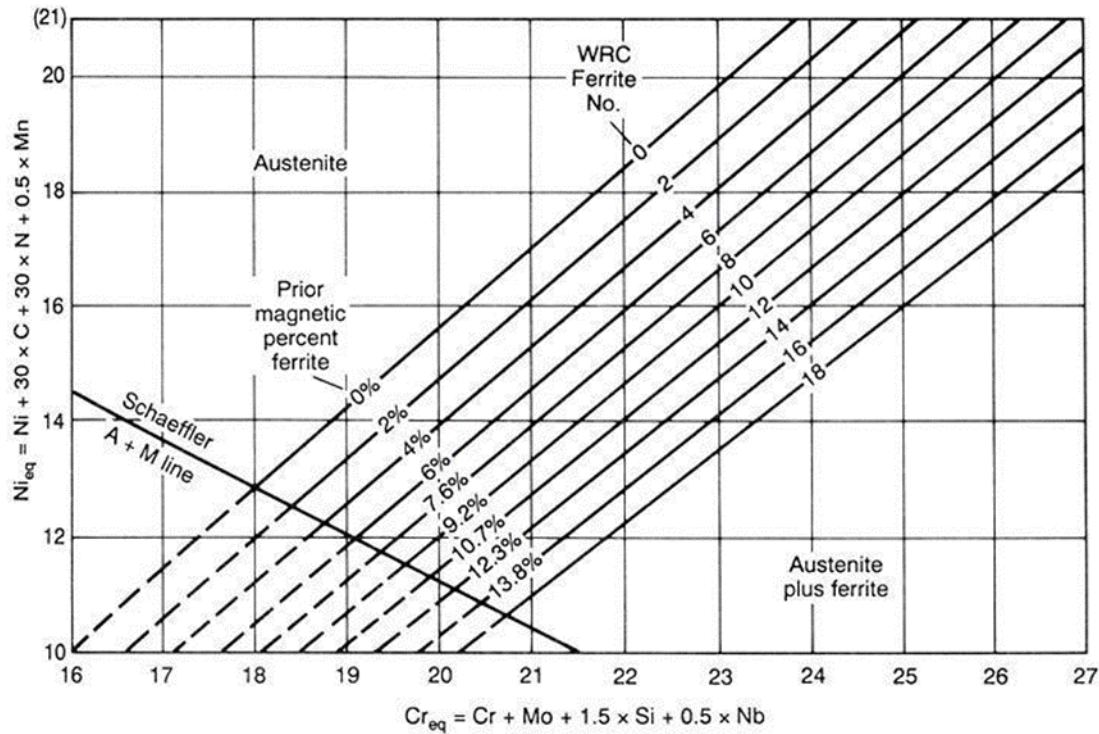


Tomado de: <https://docplayer.es/71431360-Corporacion-mexicana-de-investigacion-en-materiales-division-de-estudios-de-posgrado.html>

El más reciente diagrama es el WRC-1992, el cual es considerado el más exacto hasta el presente. En este, el Ni eq. y el Cr eq. difieren de los utilizados en el de Shaeffler y en el de DeLong.

Las predicciones realizadas por los diagramas WRC y DeLong para grados comunes del acero, como el 308, son similares, pero el WRC generalmente es más preciso para los grados menos comunes austeníticos de alto manganeso o dúplex.

Diagrama de DeLong, para la predicción de la estructura en los aceros inoxidables.



Tomado de: <https://1library.co/document/y6e1xegz-caracterizacion-soldadura-aceros-inoxidables-ferriticos-material-aporte-austenitico.html>

## Soldabilidad de los aceros inoxidables ferríticos:

Los aceros inoxidables ferríticos contienen de 10,5 a 30% de Cr, hasta 0,20% de C y en ocasiones elementos estabilizadores de la ferrita como son Al, Nb, Ti y Mo. Ellos son ferríticos a todas las temperaturas por lo cual no sufren la transformación austenítica y no son endurecibles por tratamiento térmico.

### Composiciones típicas de los aceros inoxidable ferríticos:

Tipo AISI	Composición química %			
	Carbono	Cromo	Manganeso	Otros
405	0.08	11.5-14.3	1	0.1-0.3 Al
409	0.08	10.5-11.75	1max.	1 Si max; Ti min 6 * %C; 0.045 S; 0.045 P
429	0.12	14-16	1	1 Si
430	0.12	14-16	1	
430F	0.12	14-18	1.25	0.06 P; 0.15 S min 0.6 Mo (opt)
430FSe	0.12	14-18	1.25	0.06 P; 0.06 S; 0.15 Se min
434	0.12	19-18	1	0.75-1.25 Mo; 1 Si
436	0.12	16-18	1	0.75-1.25 Mo; (Nb+Ta)min 5 *%C; 1 Si
439	0.07	17.75-18.75	1	0.6 Si; 0.5 Ni; 0.15 Al; Ti 12*%C (1%max)
442	0.2	18-23	1	
444	0.025	17.5-19.5	1	1 Ni; 1.75-2.5 Mo; 0.035 Nmax; (Cb+Ta)min; 0.2+4 (%C+N)
446	0.2	23-27	1.5	0.25 N
26-1	0.06	25-27	0.75	0.75Ni; 0.75-1.5 Mo; 0.2-1 Ti; 0.04 N; 0.2 Cu; 0.75 Si
29-4	0.01	28-30	0.3	0.15Ni; 3.5-4.2 Mo; 0.15 Cu; 0.2 Si; 0.02 N; 0.025 P; 0.02 S
29-4-2	0.01	28-30	0.3	2-2.5 Ni; 3.5-4.2 Mo; 0.15 Cu; 0.2 Si; 0.02 N; 0.025 P; 0.02 S

### Principales problemas de soldabilidad de los aceros ferríticos:

- El punto fundamental a tener en cuenta durante la soldadura de los aceros inoxidable ferríticos es su tendencia al crecimiento del grano en la ZAC, cuando son calentados un tiempo determinado por encima de 900 °C, ocasionando pérdida de tenacidad. Durante la soldadura se debe minimizar el calor aportado. La recuperación de la tenacidad puede lograrse afinando el grano mediante deformación en frío o tratamiento térmico de recocido.
- Los aceros del tipo 430, 434, 442 y 446 (alto Cr y C) son susceptibles a la formación de martensita producto de la soldadura, con la consecuente pérdida de ductilidad y tendencia a la fisuración en frío, en condiciones de elevado embridamiento. Para la soldadura se recomienda un precalentamiento a temperatura por encima de 150 °C.

- Los aceros del tipo 430, 434, 442 y 446 (alto Cr y C) son propensos al fenómeno de la "sensibilización", por lo cual normalmente son recocidos luego de la soldadura para re-disolver los carburos de Cr y restaurar sus propiedades. Normalmente los aceros ferríticos no son afectados por este fenómeno.

## Soldabilidad de los aceros inoxidables martensíticos:

Los aceros inoxidables martensíticos contienen de 11 a 18% de Cr, hasta 1,20% de C, y poco contenido de Mn y Ni, y en ocasiones Mo. Estos aceros son endurecibles por tratamiento térmico y normalmente se emplean con estructura martensítica.

### Principales problemas de soldabilidad de los aceros martensíticos:

- La soldadura tiende a producir una ZAC con dureza elevada y frágil.
- Tendencia al agrietamiento en frío de la unión soldada, producto de la presencia de una estructura frágil (martensita), la presencia de hidrógeno disuelto y de esfuerzos residuales de soldadura.
- Para aumentar la tenacidad de la unión y prevenir el fenómeno del agrietamiento en frío se deben tomar precauciones como limpieza adecuada previo al soldeo, empleo de electrodos de bajo hidrógeno, almacenamiento y manipulación rigurosos, procedimiento de soldadura adecuado que incluyen precalentamiento y tratamiento térmico post.

### Composición química de los aceros inoxidables martensíticos:

Tipo AISI	Composición química %		
	Carbono	Cromo	Otros
403	0.15	11.5-13	0.5 Si
410	0.15	11.5-13	
414	0.15	11.5-13	1.25-2.5 Ni
416	0.15	12-14	1.25 Mn; 0.06 P; 0.15 S min 0.6 Mo (opt)
416Se	0.15	12-14	1.25 Mn; 0.06 P; 0.15 Se min
420	0.15 min.	12-14	
422	0.2-0.25	11-13	1 Mn; 0.5-1 Ni; 0.75 Si; 0.75-1.25 Mo; 0.75-1.25 W; 0.15-0.3 V; 0.025 P; 0.025 S
431	0.2	15-17	1.25-2.5 Ni
440A	0.6-0.75	16-18	0.75 Mo
440B	0.75-0.95	16-18	0.75 Mo
440C	0.95-1.2	16-18	0.75 Mo

Pre calentamiento y tratamiento térmico post-soldadura para los aceros inoxidables martensíticos, calentamiento hasta 800-870 °C, seguido por enfriamiento en el horno hasta los 600 °C y luego enfriamiento al aire.

% de C	Temp. Pre calent.	Trat. Post-soldadura
< 0,1	No	Opcional
0,1-0,2	200-260°C	Opcional, con enfriamiento lento de la soldadura
0,2-0,5	260-320°C	Obligatorio
> 0,5	260-320°C	Obligatorio

## Soldabilidad de los aceros inoxidables *Dúplex*:

Los aceros inoxidables *Dúplex* son los más recientemente desarrollados. Ellos poseen una estructura de aproximadamente igual cantidad de fase ferrítica y austenítica, lo cual le confiere un límite de fluencia superior y mayor resistencia al "agrietamiento por tenso-corrosión" que los aceros austeníticos y martensíticos ordinarios.

### Composición química de los aceros inoxidables *Dúplex*:

Aleación	Composición química %							
	C	Cr	Ni	Mn	Mo	N	Si	Otros
255 (Ferralium)	0.04	24-27	4.5-6.5	1.5	2-4	0.1-0.25	1	1.5-2.5 Cu;
2205 (Sandvik)	0.03	21-23	4.5-6.5	2	2.5-3.5	0.08-0.2	1	
2304 (Sandvik)	0.03	23	4	2.5	-	0.1	1	
NU744LN (Uddeholm)	0.067	21.6	4.9	1.7	2.4	0.1	0.44	0.2 Cu, 0.001 S, 0.024 P
21-9 experimental	0.024	20.8	9	1.7	0.07	0.007	0.62	0.008 S, 0.025 P
23-7 experimental	0.033	22.8	7.1	1.8	0.06	0.006	0.54	0.008 S, 0.027 P

### **Principales problemas de soldabilidad de los aceros *Dúplex*:**

- Poseen buena soldabilidad, no obstante, puede ocurrir agrietamiento en caliente o agrietamiento en frío en la unión soldada.
- Si se emplea un aporte de composición química idéntica al MB, se obtendrá un metal depositado casi 100% ferrítico, lo cual no es deseable ya que es más susceptible al agrietamiento en caliente. La recomendación consiste en soldar con un aporte de composición cercana al material base, pero con mayor contenido de Ni que garantice un depósito de soldadura con aproximadamente igual cantidad de ferrita que austenita.
- Normalmente no se recomienda precalentamiento o tratamiento térmico posterior.

### **Soldabilidad de los aceros inoxidable endurecibles por precipitación:**

Estos aceros ofrecen una combinación de propiedades única, con la mejor resistencia mecánica, la mejor resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación. Como su nombre lo indica, alcanzan estas propiedades mediante un endurecimiento por precipitación.

Existen tres clases: martensíticos, austeníticos o semiausteníticos.



**Composición química de los aceros endurecibles por precipitación:**

Aleación	Composición química %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Al	Mo	Otros
<b>Semiausteníticos</b>								
17-7 PH	0.09 max.	1 max	1 max	16-18	6.5-7.75	0.75-1.5	-	-
PH 17-7 Mo	0.09 max	1 max	1 max	14-16	6.5-7.75	0.75-1.5	2-3	-
AM-350	0.12 max	0.9	0.5 max	16-17	4-5	-	2.5-3.25	0.1N
AM-355	0.15 max	0.95	0.5 max	15-16	4-5	-	2.5-3.25	0.1N
PH 14-8 Mo	0.04	-	-	14	8	1.2	2.3	-
<b>Martensíticos</b>								
Stainless W	0.12 max	1 max	1 max	16-18	6-8	1	-	1Ti,0.2N
17- 4 PH	0.07 max	1 max	1 max	15.5-17.5	3-5	-	-	3-5Cu 0.15-0.45 Nb+Ta
15-5 PH	0.07 max	1 max	1 max	14-15.5	3.5-5.5	-	-	2.5-5.5Cu 0.15-0.45 Nb+Ta
414 Ti	0.08 max	1 max	0.75 max	10.5-12.5	1.5-3.5	-	-	0.75Ti
Almar 363	0.05 max	0.3 max	0.15 max	11-12	4-5	-	-	10*%C Ti
PH 13-8 Mo	0.03	-	-	12.5	8	1.1	2.2	-
AM-362	0.03	-	-	14.5	6.5	-	-	0.8Ti
Custom 450	0.03	0.25	0.25	15	6	-	0.8	1.5Cu, 0.3 Nb
Custom 455	0.03	-	-	12	8.5	-	-	0.4Nb+Ta, 1.2Ti, 2Cu
<b>Austeníticos</b>								
A-286	0.080 max	1.2-2	0.4-1	13.5-16	24-28	0.35 max	-	1-1.5Ti, 0.1-0.5V
17-10 P	0.1-0.14	0.5-1	0.6	16.5-17.5	9.75-10.75	-	-	0.25-0.3P
HNM	0.3	3.5	0.5	18.5	9.5	-	-	0.25P

**Principales problemas de soldabilidad de los aceros endurecibles por precipitación:**

- Para la soldadura de los estos aceros no es necesario precalentamiento. Los tipos martensíticos y semiausteníticos no son propensos a la fisuración. Los austeníticos pueden presentar en la zona afectada térmicamente fisuración en caliente, lo cual dificulta su soldabilidad. Por otra parte, su menor ductilidad y su mayor sensibilidad a la fisuración con entallas obliga a un cuidadoso diseño del grado de embridamiento a que va a estar sometida la unión.
- La soldadura puede realizarse por los procesos convencionales empleados en los aceros inoxidables, con la dificultad de la soldadura con electrodo revestido, al no disponerse de materiales de aporte con la misma composición que los diferentes tipos de aceros.

- Cuando la unión no vaya a ser sometida a un alto grado de esfuerzo, el empleo de aportes austeníticos o de base níquel es ampliamente utilizado, al igual que para uniones disímiles entre estos aceros y los aceros al carbono.
- En los aceros martensíticos, cuando la soldadura se realiza en una sola pasada, el metal fundido y la zona afectada térmicamente responderán análogamente a un tratamiento post-soldadura y la dureza obtenida en las diferentes zonas de la unión será uniforme; sin embargo, con la técnica de varias pasadas no podrá garantizarse la uniformidad estructural y se hace necesario, si dicho control es importante, un recocido de homogenización.

Un concepto fundamental en la soldadura de aceros inoxidable lo constituye el coeficiente de dilución, que no es más que el grado de mezcla que tendrá lugar entre el metal base y el de aporte.

En el caso de este tipo de aceros, este es necesario para conocer la composición química de la zona de la costura y poder aplicar los diagramas para el análisis de la estructura a obtener en el depósito.

Conociendo el coeficiente de dilución y la composición del metal de aporte de las piezas rellenadas, se podrá calcular el porcentaje de cada elemento de aleación en la costura.

Para esto puede emplearse la siguiente ecuación:

$$\%E_x = (D * \%E_{xMB}) + [(1 - D) * \%E_{xMA}]$$

$\%E_x$ ----- Por ciento del elemento en la capa aportada

$\%E_{xMB}$ ----- Por ciento del elemento en el metal o pieza a rellenar

D----- Coeficiente de dilución.

$\%E_{xMA}$ ----- Por ciento del elemento que deposita el metal de aporte

## Valores del coeficiente de dilución según el proceso de relleno superficial empleado.

PROCESO DE RECUBRIMIENTO	CARACTERÍSTICAS	COEFICIENTE DE DILUCIÓN
Soldadura s gas (OFW)	Llama neutra	0.01- 0.1
Soldadura manual (SMAW)	Revestimiento celuloso	0.40-0.55
	Revestimiento de Rutilo	0.35-0.40
	Revestimiento básico	0.30-0.35
	Electrodo tubular revestido:	
	Rutilo	0.19-0.22
	Básico	0.22-0.25
Soldadura semiautomática bajo gas protector (GMAW)	Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0.55-0.60
Electrodo auto protegido Alambre tubular (FCAW)		0.60-0.65
Soldadura bajo arco sumergido(SAW)	Un solo alambre	0.40-0.60
	Multialambre	0.35-0.40
	Electrodo cinta sinterizada	0.30-0.35
	Cinta de relleno	0.35-0.40
Metalizado	En frío y en caliente	≈0

### Ejemplo de utilización práctica del *Diagrama de Shaeffler*

Se desea predecir ahora la estructura de un depósito realizado con electrodo inoxidable austenítico E309 sobre un acero al carbono, considerando igualmente una dilución del 20%.

