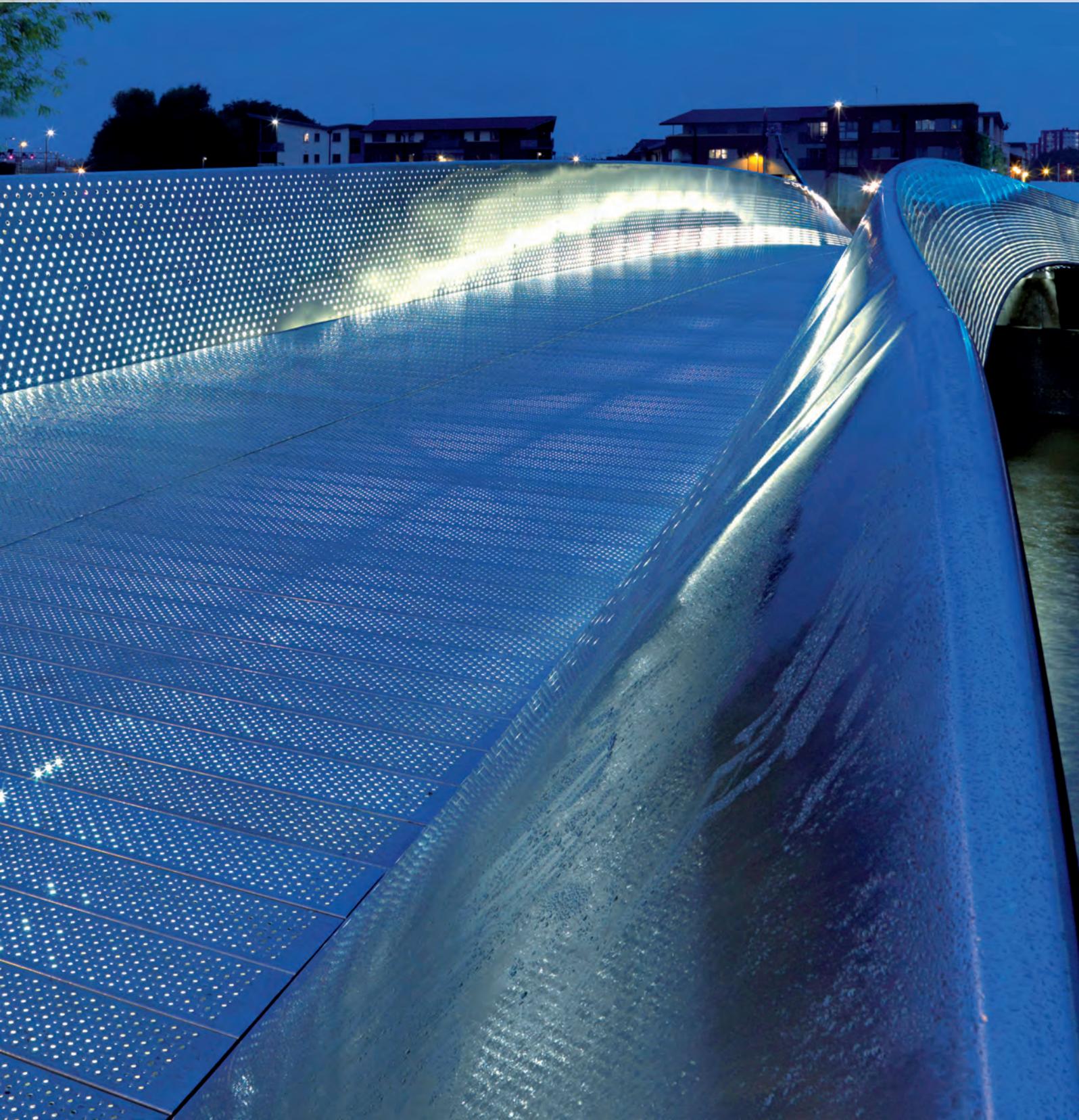


# Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex



**Directrices Prácticas para la Fabricación de los  
Aceros Inoxidables Dúplex**

Primera edición 2012

© IMOA 1999-2012

ISBN 978-1-907470-02-8

Publicado por la International Molybdenum Association  
(IMOA), Londres, Reino Unido

[www.imoa.info](http://www.imoa.info)

[info@imoa.info](mailto:info@imoa.info)

Preparado por TMR Stainless, Pittsburgh, PA, USA

La traducción al Español ha sido realizada por Germán  
Hernández Riesco con la colaboración de José R. Ibars  
Almonacil.

Diseñado por circa drei, Munich, Alemania

**Agradecimientos:**

IMOA agradece al International Stainless Steel Forum  
y a Euro Inox por su apoyo y revisión de este manual.  
También quisiéramos expresar nuestro agradecimiento  
a las siguientes empresas por sus contribuciones y  
detalladas informaciones: Acerinox, Allegheny Ludlum,  
Aquatech, Aperam, Baosteel, Columbus Stainless, JSL  
Limited, Nippon Yakin Kogyo, North American Stainless,  
Outokumpu Stainless, Sandvik, Swagelok y Yieh United  
Steel Corporation.

International Molybdenum Association (IMOA) se ha  
esforzado para asegurar que la información presen-  
tada sea técnicamente correcta. Sin embargo, IMOA  
no representa o garantiza la exactitud de la informa-  
ción contenida en este manual o su idoneidad para  
cualquier utilización específica o de tipo general. Se  
advierte al lector que el material que contiene solo  
es con fines informativos; no se pretende que sea un  
sustituto de los procedimientos de cualquier persona,  
y no debe emplearse o basarse para cualquier apli-  
cación general o específica sin tener con anteriori-  
dad el competente consejo. IMOA, sus miembros, sus  
empleados y sus consultores se consideran específicamente  
exentos de toda obligación y responsabilidad,  
por cualquier tipo de pérdida o daño que resultase del  
empleo de la información contenida en esta publicación.  
Las especificaciones EN y ASTM se han utilizado pre-  
dominantemente en esta publicación; sin embargo,  
las especificaciones de materiales pueden variar de  
un país a otro.

**Foto de portada: Meads Reach, Temple Quai, Bristol,  
Reino Unido (Fuente: [www.m-tec.uk.com](http://www.m-tec.uk.com) (fabricante),  
[www.photogenics.com](http://www.photogenics.com) (foto))**

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>4</b>	11.1	Directrices generales para el mecanizado de los aceros inoxidables dúplex	32
<b>2</b>	<b>Historia de los Aceros Inoxidables Dúplex</b>	<b>5</b>	11.2	Torneado y refrentado	33
<b>3</b>	<b>Composición Química y Función de los Elementos de Aleación</b>	<b>8</b>	11.3	Refrentado con carburos cementados	34
3.1	Composición química de los aceros inoxidables dúplex	8	11.4	Taladrado helicoidal con brocas de acero de alta velocidad	34
3.2	Función de los elementos de aleación en los aceros inoxidables dúplex	8	<b>12</b>	<b>Soldadura de los Aceros Inoxidables Dúplex</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>Metalurgia de los Aceros Inoxidables Dúplex</b>	<b>10</b>	12.1	Directrices generales de soldadura	36
<b>5</b>	<b>Resistencia a la corrosión</b>	<b>13</b>	12.1.1	Diferencias entre los aceros inoxidables austeníticos y los dúplex	36
5.1	Resistencia a los ácidos	13	12.1.2	Selección del material	36
5.2	Resistencia a las bases	14	12.1.3	Limpieza antes de la soldadura	36
5.3	Resistencia a la corrosión por picaduras y por intersticios	14	12.1.4	Diseño de la unión	36
5.4	Resistencia a la corrosión bajo tensiones	15	12.1.5	Precalentamiento	38
<b>6</b>	<b>Especificaciones del Usuario Final y Control de Calidad</b>	<b>18</b>	12.1.6	Aporte térmico y temperatura entre pasadas	38
6.1	Requisitos de ensayos normalizados	18	12.1.7	Tratamiento térmico posterior a la soldadura	38
6.1.1	Composición química	18	12.1.8	Equilibrio de fases deseable	38
6.1.2	Recocido de solubilización y enfriamiento	18	12.1.9	Soldadura de metales diferentes	39
6.2	Requisitos de ensayos especiales	19	12.2	Cualificación del procedimiento de soldadura	40
6.2.1	Ensayos de tracción y de dureza	19	12.3	Procesos de soldadura	40
6.2.2	Ensayos de doblado	19	12.3.1	Soldadura por arco con gas inerte y electrodo de wolframio (GTAW/TIG)	40
6.2.3	Ensayos de impacto e inspección metalográfica para fases intermetálicas	20	12.3.2	Soldadura por arco con gas inerte y electrodo consumible (GMAW/MIG)	42
6.2.4	Equilibrio de fases determinado por metalografía o por mediciones magnéticas	20	12.3.3	Soldadura por arco con alambre tubular (FCW)	44
6.2.5	Ensayos de corrosión	21	12.3.4	Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)	44
6.2.6	Soldadura en producción e inspección	22	12.3.5	Soldadura por arco sumergido (SAW)	46
<b>7</b>	<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>23</b>	12.3.6	Soldadura por haz de electrones y por láser	46
<b>8</b>	<b>Propiedades Físicas</b>	<b>26</b>	12.3.7	Soldadura por resistencia	46
<b>9</b>	<b>Corte</b>	<b>28</b>	<b>13</b>	<b>Otras Técnicas de Unión</b>	<b>47</b>
9.1	Corte con sierra mecánica	28	13.1	Preparación de la unión	47
9.2	Corte con cizalla	28	13.2	Adhesivos	47
9.3	Corte longitudinal	28	13.3	Soldadura blanda	47
9.4	Punzonado	28	13.4	Soldadura fuerte	48
9.5	Corte por plasma y láser	28	<b>14</b>	<b>Limpieza Posterior a la Fabricación</b>	<b>49</b>
<b>10</b>	<b>Conformado</b>	<b>29</b>	14.1	Marcas de rotulador, pintura, suciedad, aceite	49
10.1	Conformado en caliente	29	14.2	Hierro atrapado (contaminación ferrítica)	49
10.1.1	Recocido de solubilización	29	14.3	Salpicaduras de soldadura, decoloración, fundente, escoria, cebados de arco	50
10.2	Conformado a media temperatura	30	<b>15</b>	<b>Aplicaciones del Acero Inoxidable Dúplex</b>	<b>51</b>
10.3	Conformado en frío	30		<b>Bibliografía Adicional Recomendada</b>	<b>54</b>
10.4	Conformado en prensa	31		<b>Referencias</b>	<b>57</b>
10.5	Repulsado	31		<b>Apéndice 1: Designaciones y Nombres de Productos de Aceros Inoxidables Dúplex</b>	<b>58</b>
<b>11</b>	<b>Mecanizado de los Aceros Inoxidables Dúplex</b>	<b>32</b>		<b>Apéndice 2: Resumen de Especificaciones</b>	<b>60</b>

# 1 Introducción

Los aceros inoxidable dúplex son una familia que combina buena resistencia a la corrosión con alta resistencia y facilidad de fabricación. Sus propiedades físicas se sitúan entre las de los aceros inoxidable austeníticos y ferríticos, pero con tendencia a estar más próximas a las de los aceros ferríticos y aceros al carbono. La resistencia de los aceros inoxidable dúplex a la corrosión por picaduras y a la corrosión por intersticios causadas por cloruros, es función del contenido de cromo, molibdeno, wolframio y nitrógeno. Puede ser similar a la del EN 1.4401 (AISI 316), o superior a la de los aceros inoxidable para aplicaciones marinas como los austeníticos con 6 % de Mo.

Todos los aceros inoxidable dúplex tienen una resistencia a la corrosión bajo tensiones en presencia de cloruros muy superior a la de los aceros inoxidable austeníticos de la serie 300. Todos ellos poseen una resistencia mecánica significativamente mayor que la de los tipos austeníticos, además de una buena ductilidad y tenacidad.

Aunque hay muchas similitudes en la fabricación de los aceros inoxidable dúplex y los austeníticos, también hay diferencias importantes. El alto contenido de aleantes y la elevada resistencia mecánica de los tipos de acero dúplex requieren algunos cambios en el proceso de fabricación. Este manual está destinado a fabricantes y usuarios finales con responsabilidades de fabricación. Presenta, en un único documento, información práctica para la fabricación satisfactoria de aceros inoxidable dúplex. Esta publicación supone que el lector ya tiene experiencia en la fabricación con aceros inoxidable; así pues, proporciona datos comparando propiedades y prácticas de fabricación con aceros inoxidable dúplex con las de aceros austeníticos de la serie 300 y las del acero al carbono.

La fabricación con aceros inoxidable dúplex es diferente, pero no difícil.



Puente de acero inoxidable dúplex en Estocolmo, Suecia (Fuente: Outokumpu)

## 2 Historia de los Aceros Inoxidables Dúplex

Los aceros inoxidables dúplex, aquéllos con una microestructura mixta de proporciones aproximadamente iguales de austenita y ferrita, han existido desde hace casi 80 años. Los primeros tipos eran aleaciones de cromo, níquel y molibdeno. Los primeros aceros inoxidables dúplex laminados se produjeron en Suecia en 1930 y se utilizaron en la industria del papel al bisulfito con el fin de reducir los problemas de corrosión intergranular de los primeros aceros inoxidables austeníticos con alto contenido de carbono. El mismo año se producían en Finlandia piezas fundidas de acero dúplex y en 1936 se concedió en Francia una patente para el que se conocería como Uranus 50. El Tipo AISI 329 (EN 1.4460) quedó establecido después de la II Guerra Mundial, utilizándose ampliamente para tubos de intercambiadores de calor con ácido nítrico. Uno de los primeros tipos de acero dúplex específicamente desarrollado para mejorar la resistencia a la corrosión bajo tensiones en presencia de cloruros (SCC) fue el 3RE60. Durante los años siguientes, los tipos de acero dúplex, laminados o colados, se han utilizado en diferentes procesos de aplicaciones industriales, incluyendo recipientes, intercambiadores de calor y bombas.

Estos aceros inoxidables dúplex de primera generación ofrecían buenos rendimientos, pero presentaban limitaciones en las uniones soldadas. La zona afectada térmicamente (ZAT) presenta una tenacidad reducida, debido al exceso de ferrita, y una resistencia a la corrosión considerablemente menor que la del metal base. Estos problemas limitaban el uso de los aceros inoxidables dúplex de primera generación, normalmente sin soldarlos, a algunas aplicaciones específicas. La invención en 1968 del proceso de afinado del acero inoxidable por descarburación con argón y oxígeno (AOD) amplió el espectro de posibilidades de nuevos aceros inoxidables. Entre los avances obtenidos gracias al proceso AOD se incluía la adición deliberada de nitrógeno como elemento de aleación. La aleación con nitrógeno de los aceros inoxidables dúplex permite que la tenacidad de la ZAT y la resistencia a la corrosión de la unión soldada sean similares a las del metal base. Junto con el incremento de la estabilidad de la austenita, el nitrógeno también reduce la velocidad de formación de fases intermetálicas perjudiciales.

Los aceros inoxidables dúplex de segunda generación se definen por su aleación con nitrógeno. Este nuevo desarrollo comercial, iniciado a finales de los años 70, coincidió con el desarrollo de los campos petrolíferos y plataformas de gas del Mar del Norte y con la demanda de aceros inoxidables con excelente resistencia a la corrosión por cloruros, facilidad de fabricación y alta resistencia mecánica. El 2205 se convirtió en el caballo de batalla de los tipos dúplex de segunda generación y se utilizó ampliamente para conducciones de recole-



Torre de impregnación y digestión continua de pulpa de sulfato, en EN 1.4462 (2205), Sodra Cell Mönsteras, Suecia (Fuente: Kvaerner Pulping)

cción de gas y aplicaciones de procesos en plataformas marinas. La alta resistencia de estos aceros permitía reducir el espesor y, por lo tanto, el peso en las plataformas lo que incentivaba considerablemente su uso.

Al igual que los aceros inoxidables austeníticos, los aceros inoxidables dúplex son una familia de tipos que varían en su comportamiento ante la corrosión en función del contenido de aleantes. El desarrollo de los aceros inoxidables dúplex ha continuado, pudiendo dividirse en la actualidad en cinco grupos:

- dúplex de baja aleación tal como el EN 1.4362 (2304), al que deliberadamente no se añade molibdeno;
- dúplex estándar tal como el EN 1.4462 (2205), el más utilizado representando más del 80 % del uso de aceros dúplex;
- 25 % Cr dúplex, como la Aleación 255 con PREN\* inferior a 40
- súper dúplex (PREN 40–45), con 25–26 % de Cr y mayor cantidad de Mo y N en comparación con los tipos 25 % Cr, tal como el EN 1.4410 (2507);
- híper dúplex, definido como un acero inoxidable dúplex de alta aleación con un PREN mayor de 45.

\*PREN = Número Equivalente de Resistencia a las Picaduras

$$= \% \text{ Cr} + 3,3 (\% \text{ Mo} + 0,5 \% \text{ W}) + 16 \% \text{ N}$$

La **Tabla 1** muestra las composiciones químicas de los aceros inoxidables dúplex laminados o colados de segunda generación. Los tipos de acero dúplex de primera generación y los aceros inoxidables austeníticos comunes se incluyen con fines comparativos.

Nota: Todos los aceros inoxidables referenciados en el texto por nombre o designación industrial se pueden encontrar en la **Tabla 1** o en el **Apéndice 1**.

**Tabla 1: Composición química (% en peso) de aceros inoxidable dúplex laminados o colados\* (los tipos de acero austeníticos se muestran con fines comparativos)**

Tipos de acero	UNS No.	EN No.	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
<b>Aceros inoxidable dúplex laminados</b>										
<b>Tipos de acero dúplex de primera generación</b>										
329	S32900	1.4460	0,08	23,0–28,0	2,5–5,0	1,0–2,0	–	1,00	–	–
**	S31500	1.4424	0,03	18,0–19,0	4,3–5,2	2,5–3,0	0,05–0,1	–	–	–
	S32404		0,04	20,5–22,5	5,5–8,5	2,0–3,0	0,20	2,00	1,0–2,0	–
<b>Tipos de acero dúplex de segunda generación</b>										
<b>De baja aleación</b>										
	S32001	1.4482	0,03	19,5–21,5	1,0–3,0	0,6	0,05–0,17	4,0–6,0	1,0	–
	S32101	1.4162	0,04	21,0–22,0	1,35–1,7	0,1–0,8	0,20–0,25	4,0–6,0	0,1–0,8	–
	S32202	1.4062	0,03	21,5–24,0	1,0–2,8	0,45	0,18–0,26	2,00	–	–
	S82011		0,03	20,5–23,5	1,0–2,0	0,1–1,0	0,15–0,27	2,0–3,0	0,5	–
2304	S32304	1.4362	0,03	21,5–24,5	3,0–5,5	0,05–0,6	0,05–0,20	2,50	0,05–0,60	–
		1.4655	0,03	22,0–24,0	3,5–5,5	0,1–0,6	0,05–0,20	2,00	1,0–3,0	–
<b>Estándar</b>										
	S32003		0,03	19,5–22,5	3,0–4,0	1,5–2,0	0,14–0,20	2,00	–	–
2205	S31803	1.4462	0,03	21,0–23,0	4,5–6,5	2,5–3,5	0,08–0,20	2,00	–	–
2205	S32205	1.4462	0,03	22,0–23,0	4,5–6,5	3,0–3,5	0,14–0,20	2,00	–	–
<b>25 Cr</b>										
	S31200		0,03	24,0–26,0	5,5–6,5	1,2–2,0	0,14–0,20	2,00	–	–
	S31260		0,03	24,0–26,0	5,5–7,5	2,5–3,5	0,10–0,30	1,00	0,2–0,8	0,1–0,5
	S32506		0,03	24,0–26,0	5,5–7,2	3,0–3,5	0,08–0,20	1,00	–	0,05–0,30
	S32520	1.4507	0,03	24,0–26,0	5,5–8,0	3,0–4,0	0,20–0,35	1,50	0,5–2,0	–
255	S32550	1.4507	0,04	24,0–27,0	4,5–6,5	2,9–3,9	0,10–0,25	1,50	1,5–2,5	–
<b>Superdúplex</b>										
2507	S32750	1.4410	0,03	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–5,0	0,24–0,32	1,20	0,5	–
	S32760	1.4501	0,03	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–4,0	0,20–0,30	1,00	0,5–1,0	0,5–1,0
	S32808		0,03	27,0–27,9	7,0–8,2	0,8–1,2	0,30–0,40	1,10	–	2,1–2,5
	S32906		0,03	28,0–30,0	5,8–7,5	1,5–2,6	0,30–0,40	0,80–1,5	0,8	–
	S32950		0,03	26,0–29,0	3,5–5,2	1,0–2,5	0,15–0,35	2,00	–	–
	S39274		0,03	24,0–26,0	6,8–8,0	2,5–3,5	0,24–0,32	1,0	0,2–0,8	1,5–2,5
	S39277		0,025	24,0–26,0	6,5–8,0	3,0–4,0	0,23–0,33	0,80	1,2–2,0	0,8–1,2
		1.4477	0,03	28,0–30,0	5,8–7,5	1,5–2,6	0,30–0,40	0,80–1,50	≤0,8	–
<b>Hiperdúplex</b>										
	S32707		0,03	26,0–29,0	5,5–9,5	4,0–5,0	0,30–0,50	1,50	1,0	–
	S33207		0,03	29,0–33,0	6,0–9,0	3,0–5,0	0,40–0,60	1,50	1,0	–

Tipos de acero	UNS No.	EN No.	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
<b>Aceros inoxidables austeníticos laminados</b>										
304L	S30403	1.4307	0,03	17,5–19,5	8,0–12,0	–	0,10	2,00	–	–
316L	S31603	1.4404	0,03	16,0–18,0	10,0–14,0	2,0–3,0	0,10	2,00	–	–
317L	S31703	1.4438	0,03	18,0–20,0	11,0–15,0	3,0–4,0	0,10	2,00	–	–
317LMN	S31726	1.4439	0,03	17,0–20,0	13,5–17,5	4,0–5,0	0,10–0,20	2,00	–	–
904L	N08904	1.4539	0,02	19,0–23,0	23,0–28,0	4,0–5,0	0,10	2,00	1,0–2,0	–
<b>Aceros inoxidables dúplex colados</b>										
CD4MCu Grade 1A	J93370		0,04	24,5–26,5	4,75–6,0	1,75–2,25	–	1,00	2,75–3,25	–
CD4MCuN Grade 1B	J93372		0,04	24,5–26,5	4,7–6,0	1,7–2,3	0,10–0,25	1,00	2,7–3,3	–
CD3MCuN Grade 1C	J93373		0,03	24,0–26,7	5,6–6,7	2,9–3,8	0,22–0,33	1,20	1,4–1,9	–
CE8MN Grade 2A	J93345		0,08	22,5–25,5	8,0–11,0	3,0–4,5	0,10–0,30	1,00	–	–
CD6MN Grade 3A	J93371		0,06	24,0–27,0	4,0–6,0	1,75–2,5	0,15–0,25	1,00	–	–
CD3MN Cast 2205 Grade 4A	J92205		0,03	21,0–23,5	4,5–6,5	2,5–3,5	0,10–0,30	1,50	–	–
CE3MN Cast 2507 Grade 5A	J93404	1.4463	0,03	24,0–26,0	6,0–8,0	4,0–5,0	0,10–0,30	1,50	–	–
CD3MWCuN Grade 6A	J93380		0,03	24,0–26,0	6,5–8,5	3,0–4,0	0,20–0,30	1,00	0,5–1,0	0,5–1,0
<b>Aceros inoxidables austeníticos colados</b>										
CF3 (cast 304L)	J92500	1.4306	0,03	17,0–21,0	8,0–12,0	–	–	1,50	–	–
CF3M (cast 316L)	J92800	1.4404	0,03	17,0–21,0	9,0–13,0	2,0–3,0	–	1,50	–	–

\* Máximo, a menos que se indique el rango o el mínimo.

– No definido en las especificaciones.

\*\* Este tipo de acero se produjo originalmente sin adición de nitrógeno; sin esta adición se consideraría un dúplex de primera generación.

## 3 Composición Química y Función de los Elementos de Aleación

### 3.1 Composición química de los aceros inoxidables dúplex

Normalmente se acepta que las favorables propiedades de los aceros inoxidables dúplex pueden conseguirse con equilibrios de fases del 30 % al 70 % de ferrita y austenita. Sin embargo, es habitual considerar que los aceros inoxidables dúplex tienen cantidades aproximadamente iguales de ferrita y austenita, favoreciéndose ligeramente en la actualidad la austenita para mejorar la tenacidad y las características de procesado. Las interacciones de los elementos de aleación más importantes, especialmente el cromo, molibdeno, nitrógeno y níquel, son bastante complejas. Para conseguir una estructura dúplex estable que responda bien al procesado y a la fabricación, se debe cuidar la obtención del nivel correcto de cada uno de estos elementos.

Además del equilibrio de fases, existe un segundo problema importante con los aceros inoxidables dúplex y su composición química: la formación de fases intermetálicas perjudiciales a temperaturas elevadas. Las fases sigma y chi se forman en aceros inoxidables con alto contenido de cromo y de molibdeno, precipitándose preferentemente en la ferrita. La adición de nitrógeno retarda significativamente la formación de estas fases. Por lo tanto, es esencial que esté presente suficiente nitrógeno en solución sólida. La importancia de rangos estrechos de composición química se ha puesto de manifiesto conforme ha aumentado la experiencia con los aceros inoxidables dúplex. El rango de composición inicial para el 2205 (UNS S31803, Tabla 1) era demasiado amplio. La experiencia ha demostrado que para una óptima resistencia a la corrosión y evitar las fases intermetálicas, los niveles de cromo, molibdeno y nitrógeno deberían ser los de la mitad superior de sus rangos para el S31803. Por ello se introdujo un 2205 modificado, el UNS S32205 (Tabla 1), con un rango de composición más estrecho que es el típico de la producción actual del 2205. A menos que se indique otra cosa en esta publicación, 2205 hace referencia a la composición del S32205.

### 3.2 Función de los elementos de aleación en los aceros inoxidables dúplex

A continuación se presenta brevemente el efecto de los elementos de aleación más importantes sobre las propiedades mecánicas, físicas y de corrosión de los aceros inoxidables dúplex.

**Cromo:** Es necesario un mínimo de alrededor del 10,5 % de cromo para formar una película pasiva de óxido de cromo estable que proteja eficazmente un acero contra la corrosión atmosférica leve. La resistencia a la corrosión del acero inoxidable aumenta con el contenido de cromo. El cromo es un formador de ferrita, promoviendo la estructura cúbica centrada en el cuerpo del hierro. A mayores contenidos de cromo, se necesita más níquel para formar una estructura austenítica o dúplex (austenítica-ferrítica). Un contenido alto de cromo también favorece la formación de fases intermetálicas. Normalmente, el contenido mínimo de cromo en los aceros inoxidables austeníticos es del 16 % y en los tipos dúplex del 20 %. El cromo también aumenta la resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Este efecto es importante debido a su influencia en la formación y eliminación de la cascarilla de óxido o de la coloración resultante tras un tratamiento térmico o la soldadura. El decapado y la retirada de la coloración es más difícil con los inoxidables dúplex que con los inoxidables austeníticos.

**Molibdeno:** El molibdeno actúa para apoyar al cromo en la resistencia contra la corrosión por picaduras de los aceros inoxidables. Cuando el contenido mínimo de cromo es del 18 %, la adición de molibdeno resulta aproximadamente tres veces más eficaz que la de cromo contra la corrosión por picaduras y por intersticios en presencia de cloruros. El molibdeno es un formador de ferrita y también aumenta la tendencia de los aceros inoxidables a formar fases intermetálicas perjudiciales. Por ello, su contenido se reduce normalmente a menos del 7,5 % en los inoxidables austeníticos y del 4 % en los inoxidables dúplex.

**Nitrógeno:** El nitrógeno aumenta la resistencia a la corrosión por picaduras y por intersticios de los aceros inoxidables austeníticos y dúplex. También aumenta sustancialmente su resistencia mecánica y es, de hecho, el elemento reforzador de la solución sólida más eficaz y un aleante de bajo coste. La mejor tenacidad de los inoxidables dúplex con nitrógeno se debe a su mayor contenido de austenita y al menor contenido intermetálico. El nitrógeno no impide la precipitación de fases intermetálicas, pero retrasa su formación lo suficiente como para permitir el procesado y fabricación de los tipos dúplex. El nitrógeno se añade a los aceros inoxidables dúplex y austeníticos de alta resistencia a la corrosión con elevados contenidos de cromo y molibdeno para compensar su tendencia a formar la fase sigma.

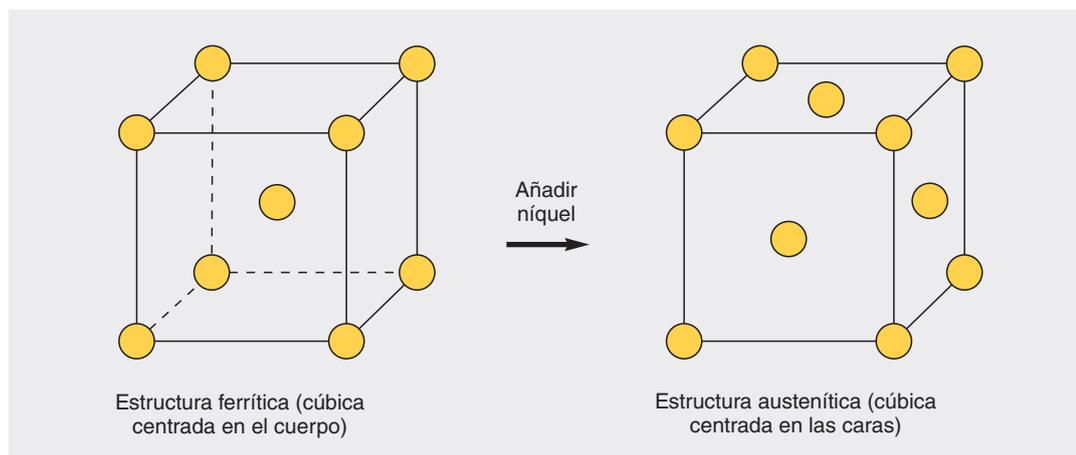
El nitrógeno es un potente formador de austenita y puede reemplazar algo de níquel en los aceros inoxidables austeníticos. El nitrógeno reduce la energía de

los defectos de apilamiento y aumenta la velocidad de endurecimiento por deformación de la austenita.

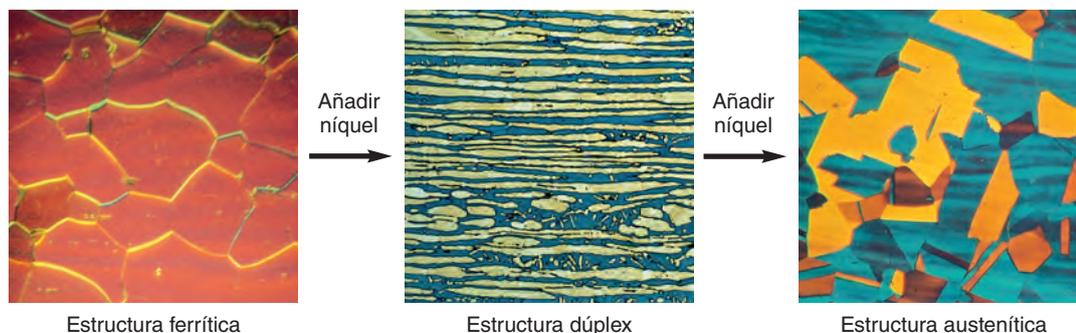
También aumenta la resistencia mecánica de la austenita por endurecimiento de la solución sólida. En los aceros inoxidable dúplex normalmente se añade nitrógeno y se ajusta el níquel con el fin de conseguir el equilibrio de fases deseado. Los formadores de ferrita, cromo y molibdeno, se equilibran con los formadores de austenita, níquel y nitrógeno, para desarrollar la estructura dúplex.

**Níquel:** El níquel es un estabilizador de la austenita, que promueve el cambio de la estructura cristalina del acero inoxidable de cúbica centrada en el cuerpo (ferrítica) a cúbica centrada en las caras (austenítica).

Los inoxidables ferríticos contienen poco o nada de níquel, los inoxidables dúplex contienen una cantidad entre reducida e intermedia, del 1,5 % al 7 %, y los inoxidables austeníticos de la serie 300 contienen al menos un 6 % (ver las Figuras 1 y 2). La adición de níquel retrasa la formación de fases intermetálicas perjudiciales en los inoxidables austeníticos, pero es mucho menos eficaz que el nitrógeno en el retraso de su formación en los inoxidables dúplex. La estructura cúbica centrada en las caras es la responsable de la excelente tenacidad de los inoxidables austeníticos. Su presencia en aproximadamente la mitad de la microestructura de los tipos dúplex, aumenta en gran medida su tenacidad en comparación con los inoxidables ferríticos.



**Figura 1:** Añadiendo níquel, la estructura cristalográfica cambia de cúbica centrada en el cuerpo (poco o nada de níquel) a cúbica centrada en las caras (mínimo 6 % de níquel en la serie 300). La microestructura de los inoxidables dúplex, con contenido intermedio de níquel, contiene algunos granos ferríticos y otros austeníticos, idealmente en las mismas cantidades (Figura 2).



**Figura 2:** Aumentando el contenido de níquel cambia la microestructura del acero inoxidable de ferrítica (izquierda) a dúplex (centro) y a austenítica (derecha). (Estas imágenes, cortesía de Outokumpu, muestran probetas pulidas y atacadas, aumentadas bajo un microscopio óptico. En la estructura dúplex, la ferrita se ha teñido de manera que aparece como la fase más oscura).

## 4 Metalurgia de los Aceros Inoxidables Dúplex

El diagrama de fases ternario hierro-cromo-níquel es un mapa de carreteras del comportamiento metalúrgico de los aceros inoxidable dúplex. Una sección con el 68 % de hierro (Figura 3) muestra que estas aleaciones solidifican como ferrita ( $\alpha$ ), transformándose parcialmente en austenita ( $\gamma$ ) conforme la temperatura se reduce hasta unos 1000 °C (1832 °F), dependiendo de la composición de la aleación. A temperaturas más bajas se producen pocos cambios adicionales en el equilibrio ferrita-austenita. En la Figura 3 (Ref. 1) también se muestra el efecto del aumento del nitrógeno. Termodinámicamente, puesto que la austenita se forma a partir de la ferrita, es imposible que la aleación sobrepase el nivel de equilibrio de la austenita. Sin embargo, según se alcanzan temperaturas más bajas, carburos, nitruros, fase sigma y otras fases intermetálicas son posibles constituyentes microestructurales.

Las cantidades relativas de ferrita y austenita en el material producido o fabricado dependen de la composición y del historial térmico del acero. Pequeños cambios en la composición pueden tener un gran efecto sobre la fracción de volumen relativa de estas dos fases, tal como muestra el diagrama de fases. Las tendencias de los elementos individuales de promover la formación de austenita o de ferrita son de aplicación a los tipos dúplex. El equilibrio de las fases ferrita/austenita en la microestructura puede

predecirse con regresión lineal multivariable como sigue:

$$Cr_{eq} = \% Cr + 1,73 \% Si + 0,88 \% Mo$$

$$Ni_{eq} = \% Ni + 24,55 \% C + 21,75 \% N + 0,4 \% Cu$$

$$\% Ferrite = -20,93 + 4,01 Cr_{eq} - 5,6 Ni_{eq} + 0,016 T$$

donde T (en grados Celsius) es la temperatura de recocido de 1050 a 1150 °C y las composiciones de los elementos en % en peso (Ref. 2). El objetivo de mantener el equilibrio de fases deseado en un acero inoxidable dúplex se consigue, fundamentalmente, ajustando los contenidos de cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno y, posteriormente, controlando el historial térmico. Sin embargo, puesto que la velocidad de enfriamiento determina la cantidad de ferrita que puede transformarse en austenita, tras exposiciones a altas temperaturas las velocidades de enfriamiento influyen sobre el equilibrio de fases. Debido a que las velocidades de enfriamiento altas favorecen la retención de ferrita, es posible tener más cantidad de ferrita que la de equilibrio. Por ejemplo, la soldadura de bajo aporte térmico de una sección gruesa puede provocar un exceso de ferrita en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT).

Otro efecto beneficioso del nitrógeno, reflejado en la Figura 3, es que eleva la temperatura a la que la austenita comienza a formarse a partir de la ferrita. Esto aumenta la velocidad de la transformación de ferrita a austenita. Por lo tanto, incluso a velocidades de enfriamiento relativamente rápidas, se puede alcanzar el nivel de equilibrio de la austenita. En los inoxidables dúplex de segunda generación, este efecto reduce el problema de exceso de ferrita en la ZAT.

Como la fase sigma precipita durante el enfriamiento a temperaturas por debajo de la de formación de austenita a partir de ferrita (Figura 4), el objetivo de evitar la fase sigma en los productos laminados se consigue controlando la temperatura de recocido y asegurando que el acero se enfríe lo más rápidamente posible desde esta temperatura. La velocidad de enfriamiento necesaria es bastante rápida, lo que permite utilizar el temple con agua. Las velocidades de enfriamiento excesivas durante la fabricación sólo se presentan cuando se sueldan dimensiones muy diferentes o muy gruesas con aportes térmicos muy bajos.

La fase alfa prima también es estable en las aleaciones dúplex, formándose en la fase ferrita por debajo de unos 525 °C (950 °F) de la misma manera que se forma en aleaciones totalmente ferríticas. Alfa prima provoca la pérdida de tenacidad a temperatura ambiente en aceros inoxidables ferríticos después de mucho tiempo a unos 475 °C (885 °F); este comportamiento se conoce como fragilización a 475 °C/885 °F.

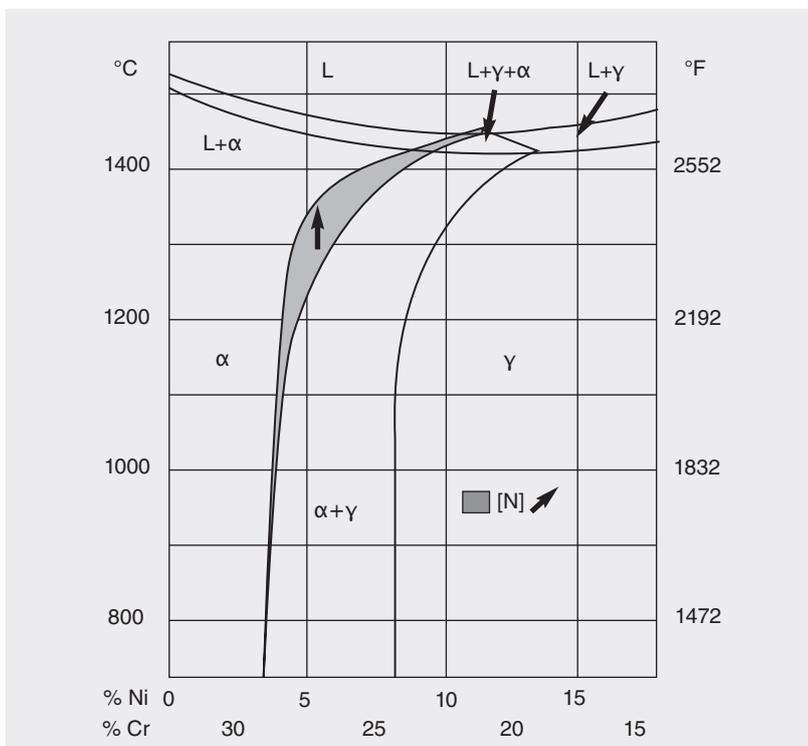
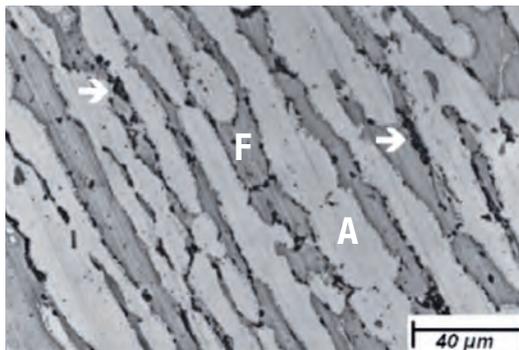


Figura 3: Sección a través del diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni con 68 % de hierro (pequeños cambios en el contenido de níquel y de cromo ejercen gran influencia en la cantidad de austenita y ferrita de los aceros inoxidables dúplex).

El uso de nitrógeno como elemento de aleación en los inoxidables dúplex significa que pueden aparecer nitruros de cromo en los bordes de granos ferrita-ferrita y austenita-ferrita de la zona afectada térmicamente de las soldaduras. Si se forman en gran cantidad bajo condiciones en las que las zonas pobres en cromo no tienen tiempo para homogeneizarse durante el recocido, estos nitruros de cromo pueden reducir la resistencia a la corrosión. Sin embargo, como un mayor contenido de nitrógeno promueve la austenita, que tiene alta solubilidad para el nitrógeno, los inoxidables dúplex de segunda generación raras veces contienen significativas cantidades de nitruros de cromo. Además, los inoxidables dúplex de segunda generación se fabrican con contenido de carbono muy bajo, por lo que la formación de carburos perjudiciales no es normalmente un problema práctico.

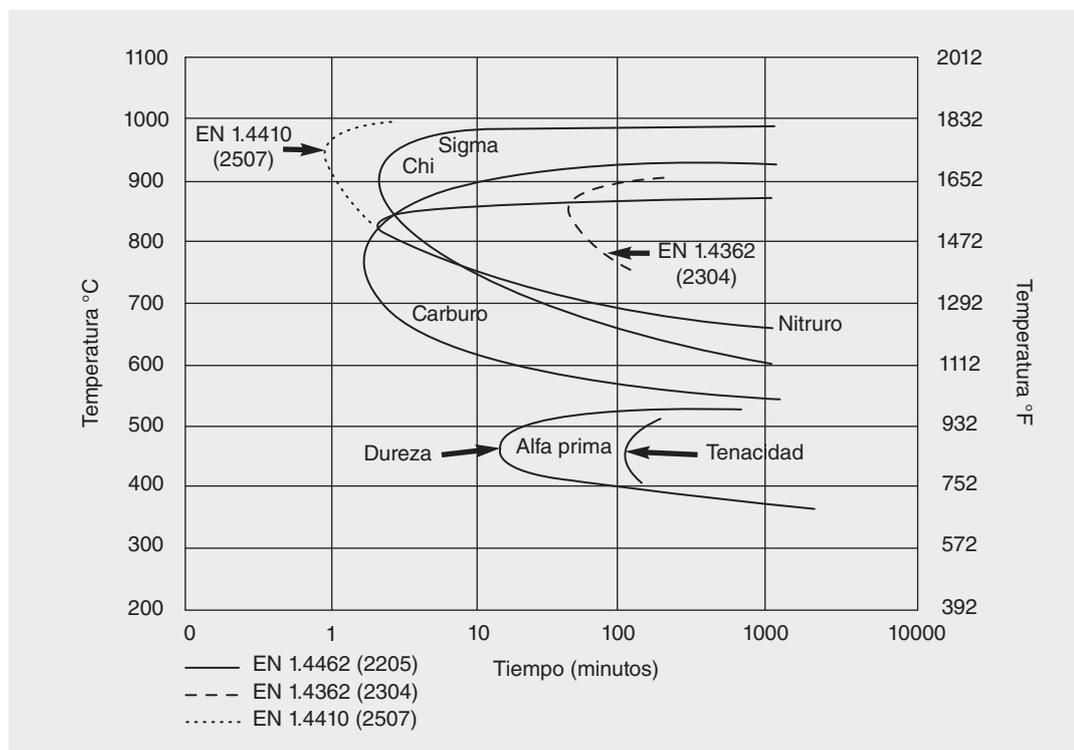


**Figura 4:** Microestructura de una muestra de 2205 envejecida a 850 °C (1560 °F) durante 40 minutos mostrando la precipitación de la fase sigma (flechas) en los bordes de granos austenita/ferrita. La fase ferrita (F) aparece más oscura que la fase austenita (A) en la micrografía (Ref. 3).

Fases perjudiciales como sigma, alfa prima y carburos y nitruros pueden formarse en minutos a ciertas temperaturas. Por lo tanto, los tratamientos térmicos necesarios en el procesado y la fabricación, así como los ciclos de servicio, deben tener en cuenta la cinética de reacción de la formación de estas fases para asegurar la obtención de las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión deseadas. Estos tipos dúplex se han desarrollado para maximizar la resistencia a la corrosión y retardar lo suficiente las reacciones de precipitación para permitir una fabricación satisfactoria.

El inicio de la precipitación de los nitruros y carburos de cromo se produce en un tiempo relativamente "lento" de 1-2 minutos, que es más lento que en los tipos ferríticos o los austeníticos altamente aleados y se debe, en parte, a la alta solubilidad del carbono y del nitrógeno en la fase austenita con poco níquel y, posiblemente, a un efecto de retraso del nitrógeno en la precipitación de carburos. Como resultado, los tipos dúplex son relativamente resistentes a la sensibilización en el enfriamiento. La cinética de formación de carburos y nitruros en estos tipos dúplex es marginalmente afectada por el cromo, molibdeno y níquel, de manera que todos los tipos de inoxidables dúplex aleados con nitrógeno tienen una cinética similar a la del 2205 respecto a estos precipitados.

En la **Figura 5** (Ref. 4, 5, 6, 7) puede verse el diagrama de precipitación isotérmico de los inoxidables dúplex EN 1.4362 (2304), EN 1.4462 (2205) y EN 1.4410 (2507).



**Figura 5:** Diagrama de precipitación isotérmico para el acero inoxidable dúplex EN 1.4462 (2205), recocido a 1050 °C (1920 °F). (Los tipos dúplex EN 1.4362 (2304) y EN 1.4410 (2507) se muestran con fines comparativos).



**Accesorios de acero inoxidable dúplex EN 1.4410 (2507)**  
(Fuente: Swagelok)

La precipitación sigma y chi se produce a temperaturas algo más altas, pero en aproximadamente el mismo tiempo que la de los carburos y nitruros. Los tipos dúplex con un mayor nivel de aleación de cromo, molibdeno y níquel tendrán una cinética sigma y chi más rápida que el EN 1.4462 (2205); en los que tengan un contenido de aleación menor será más lenta. Esto se ilustra con curvas discontinuas en la Figura 5, que muestran un inicio más temprano de la formación sigma y chi en el EN 1.4410 (2507), más aleado, y más tardío en el EN 1.4362 (2304).

Alfa prima precipita en la fase ferrita endureciéndola y fragilizándola. Afortunadamente, como los aceros inoxidables dúplex contienen un 50 % de austenita,

este endurecimiento y fragilización no es tan perjudicial como en los aceros totalmente ferríticos. La pérdida de tenacidad (fragilización) por la precipitación de alfa prima es más lenta que la velocidad de endurecimiento (Figura 5). La fragilización alfa prima raramente es un problema durante la fabricación debido a los largos tiempos necesarios para que se produzca. Sin embargo, el límite de temperatura superior en servicio se controla por la formación de alfa prima.

Puesto que una exposición prolongada a alta temperatura puede producir pérdida de tenacidad a temperatura ambiente, los códigos de diseño de recipientes a presión han establecido límites de temperatura superior para las tensiones de diseño admisibles máximas. El código TÜV alemán distingue entre construcciones soldadas y no soldadas y es más conservador en sus límites de temperatura superior que el Código ASME de Calderas y Recipientes a Presión. Los límites de temperatura en estos códigos de diseño de recipientes a presión para diversos aceros inoxidables dúplex se resumen en la **Tabla 2**.

La **tabla 3** resume varias reacciones de precipitación y límites de temperatura importantes para los aceros inoxidables dúplex.

**Tabla 2: Límites de temperatura superior de los aceros inoxidables dúplex para valores de tensiones admisibles máximas en códigos de diseño de recipientes a presión**

Tipo de acero	Condición	ASME		TÜV	
		°C	°F	°C	°F
EN 1.4362 (2304)	No soldado	315	600	300	570
EN 1.4362 (2304)	Soldado, aporte similar	315	600	300	570
EN 1.4362 (2304)	Soldado con 2205/2209	315	600	250	480
EN 1.4462 (2205)	No soldado	315	600	280	535
EN 1.4462 (2205)	Soldado	315	600	250	480
EN 1.4410 (2507)	Tubos sin soldadura	315	600	250	480
Aleación 255	Soldado o no soldado	315	600		

**Tabla 3: Temperaturas típicas para reacciones de precipitación y otras reacciones características en aceros inoxidables dúplex**

	EN 1.4462 (2205)		EN 1.4410 (2507)	
	°C	°F	°C	°F
Rango de solidificación	1470 a 1380	2680 a 2515	1450 a 1350	2640 a 2460
Temperatura de oxidación en aire	1000	1830	1000	1830
Formación fase sigma	700 a 950	1300 a 1740	700 a 1000	1300 a 1830
Precipitación de carburos	450 a 800	840 a 1470	450 a 800	840 a 1470
Fragilización 475 °C/885 °F	300 a 525	575 a 980	300 a 525	575 a 980

## 5 Resistencia a la Corrosión

Los aceros inoxidable dúplex tienen buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes en los que se utilizan los tipos austeníticos convencionales. Sin embargo, hay algunas excepciones en las que son decididamente superiores. Esto se debe a su alto contenido en cromo, beneficioso con ácidos oxidantes, que junto al suficiente molibdeno y níquel proporcionan resistencia en ambientes ácidos suavemente reductores. El contenido relativamente alto de cromo, molibdeno y nitrógeno también les confiere muy buena resistencia contra la corrosión por picaduras y por intersticios inducida por cloruros. Su estructura dúplex supone una ventaja en ambientes con potencial de agrietamiento por corrosión bajo tensiones por cloruros. Si la microestructura contiene al menos un 25–30 % de ferrita, los inoxidables dúplex son mucho más resistentes a la corrosión bajo tensiones por cloruros que los inoxidables austeníticos Tipo EN 1.4301 (AISI 304) o EN 1.4401 (AISI 316). La ferrita es, sin embargo, susceptible a la fragilización por hidrógeno, por lo que los inoxidables dúplex no tienen alta resistencia en ambientes o aplicaciones donde el hidrógeno pueda incorporarse al metal y provocar la fragilización por hidrógeno.

### 5.1 Resistencia a los ácidos

Con el fin de ilustrar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable dúplex en presencia de ácidos fuertes, la Figura 6 proporciona datos de corrosión para soluciones de ácido sulfúrico. Este ambiente oscila entre ligeramente reductor con concentraciones de ácido bajas, a oxidante con concentraciones elevadas, con un rango de composición medio fuertemente reductor en soluciones templadas y calientes. Los inoxidables dúplex EN 1.4462 (2205) y EN 1.4410 (2507) superan en rendimiento a muchos inoxidables austeníticos con alto níquel en soluciones que contengan hasta alrededor del 15 % de ácido. Son mejores que los Tipos EN 1.4401 (AISI 316) o 317 hasta al menos un 40 % de ácido. Los tipos de acero dúplex también pueden resultar muy útiles con ácidos oxidantes que contengan cloruros. Los inoxidables dúplex no tienen el níquel suficiente para resistir las intensas condiciones reductoras de las soluciones de ácido sulfúrico de concentraciones intermedias, o de ácido clorhídrico. En intercaras secas/húmedas en ambientes reductores donde hay concentración de ácido, la corrosión, especialmente de la ferrita, puede activarse y progresar rápidamente. Su resistencia a las condiciones oxidantes hace que los aceros inoxidable dúplex sean buenos candidatos para el servicio con ácido nítrico y ácidos orgánicos fuertes.

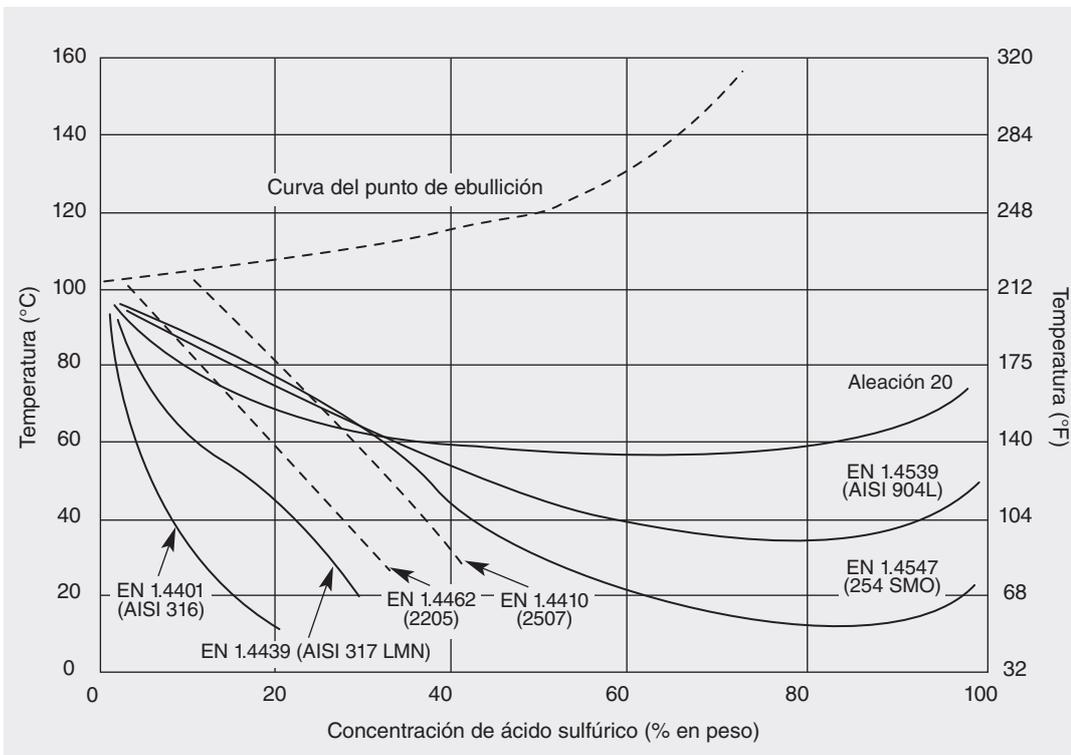


Figura 6: Diagrama de isocorrosión en ácido sulfúrico no aireado, 0,1 mm/año (0,004 pulgadas/año) (ensayos de laboratorio utilizando ácido sulfúrico grado reactivo). (Fuente: Hojas de datos de fabricantes, 254 SMO es una marca comercial de Outokumpu)

Esto se muestra en la **Figura 7** para soluciones con ácido acético al 50 % y diversas cantidades de ácido fórmico a sus temperaturas de ebullición. Aunque los Tipos EN 1.4301 (AISI 304) y EN 1.4401 (AISI 316) podrán hacer frente a estos ácidos orgánicos fuertes a temperaturas ambiente y moderadas, el EN 1.4462 (2205) y otros tipos dúplex son superiores en muchos procesos con ácidos orgánicos a altas temperaturas. Los inoxidables dúplex también se utilizan en procesos con presencia de hidrocarburos halogenados debido a su resistencia a la corrosión por picaduras y a la corrosión bajo tensiones.

## 5.2 Resistencia a las bases

El alto contenido de cromo y la presencia de ferrita proporcionan un buen rendimiento a los aceros inoxidables dúplex en ambientes cáusticos. A temperaturas moderadas, las velocidades de corrosión son menores que las de los tipos de acero austeníticos convencionales.

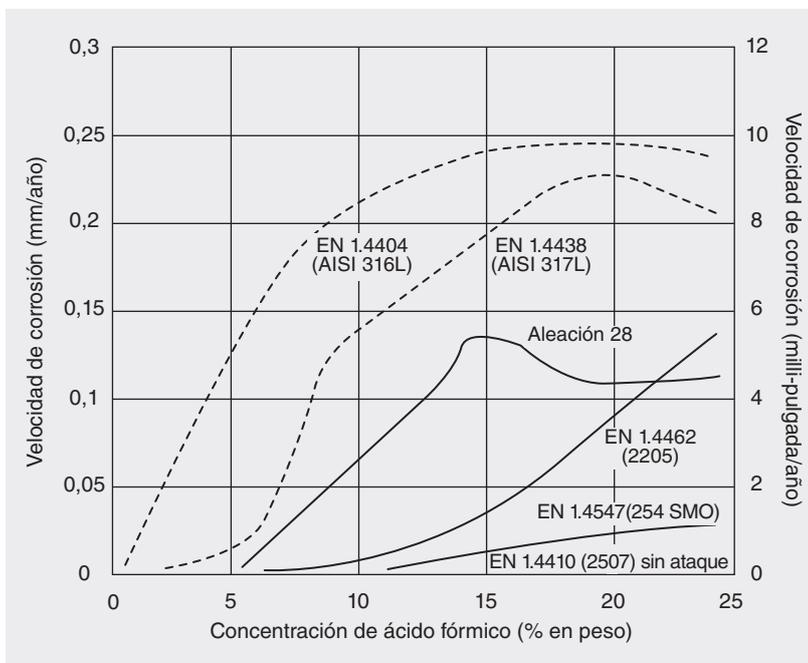
## 5.3 Resistencia a la corrosión por picaduras y por intersticios

Para discutir la resistencia a la corrosión por picaduras e intersticios de los aceros inoxidables, es útil introducir el concepto de temperaturas críticas de corrosión por picaduras. Para un ambiente de cloruros específico, cada acero inoxidable puede caracterizarse

por una temperatura sobre la cual, la corrosión por picaduras se iniciará y propagará detectándose visualmente en unas 24 horas, y por debajo de ella no se producirá el inicio de las picaduras de forma indefinida. Esta temperatura se conoce como temperatura crítica de picaduras (CPT). Es una característica de cada tipo de acero inoxidable y de un ambiente específico. Puesto que el inicio de las picaduras es estadísticamente aleatorio, y debido a la sensibilidad de la CPT a ligeras variaciones dentro de un mismo tipo de acero, normalmente la CPT se expresa para los distintos tipos de acero como un rango de temperaturas. Sin embargo, con la herramienta de investigación descrita en ASTM G 150<sup>1</sup>, es posible determinar la CPT de manera precisa y fiable con mediciones electroquímicas.

Existe una temperatura crítica similar para la corrosión por intersticios, denominada temperatura crítica por intersticios (CCT). La CCT depende de la muestra específica de acero inoxidable, del ambiente de cloruros y de la naturaleza (separación, longitud, etc.) del intersticio. Debido a esta dependencia de su geometría y a la dificultad de conseguir intersticios reproducibles en la práctica, la medición de la CCT es menos precisa que la de la CPT. Normalmente la CCT será de 15 a 20 °C (27 a 36 °F) menor que la CPT para el mismo acero y el mismo ambiente corrosivo.

El alto contenido de cromo, molibdeno y nitrógeno de los tipos dúplex proporciona muy buena resistencia a la corrosión localizada inducida por cloruros en ambientes acuosos. Dependiendo del contenido de aleantes, algunos tipos dúplex están entre los aceros inoxidables de mejor rendimiento. Por su relativamente alto contenido de cromo, los aceros inoxidables dúplex proporcionan muy buena y barata resistencia a la corrosión. En la **Figura 8** se compara la resistencia a la corrosión por picaduras y por intersticios de diversos aceros inoxidables en estado de recocido de acuerdo con los procedimientos ASTM G 48<sup>2</sup> (6 % cloruro férrico). Sería de esperar que las temperaturas críticas para los materiales en estado bruto de soldadura fueran algo más bajas. Mayores temperaturas críticas de corrosión por picaduras o por intersticios indican mayor resistencia a la iniciación de estas formas de corrosión. La CPT y la CCT del EN 1.4462 (2205) están por encima de las del Tipo EN 1.4401 (AISI 316). Esto hace del EN 1.4462 (2205) un material muy versátil en aplicaciones donde los cloruros se concentren por evaporación, así como en los espacios de vapor de intercambiadores de calor o debajo del aislamiento. La CPT del EN 1.4462 (2205) indica que es capaz de hacer frente a muchas aguas salobres y salmueras no aireadas. Se ha utilizado con éxito en aplicaciones de agua marina no aireada donde la superficie se ha mantenido libre de depósitos mediante altas



**Figura 7: Corrosión de aceros inoxidables dúplex y austeníticos en mezclas a ebullición de ácido acético al 50 % y diversas proporciones de ácido fórmico (Fuente: Sandvik)**

- 1 Método de ensayo normalizado ASTM G 150 para evaluar electroquímicamente la temperatura crítica por picaduras de aceros inoxidables
- 2 Método de ensayo normalizado ASTM G 48 para evaluar la resistencia a la corrosión por picaduras y por intersticios de aceros inoxidables y aleaciones afines por solución de cloruro férrico

velocidades de flujo u otros medios. El EN 1.4462 (2205) no presenta la suficiente resistencia a la corrosión por intersticios para resistir el agua marina en aplicaciones críticas tales como tubos de intercambiadores de calor de pared delgada, o donde existan depósitos o intersticios. Sin embargo, los aceros inoxidable dúplex de mayor aleación con una CCT más alta que la del EN 1.4462 (2205), como los tipos súper dúplex, se han utilizado en muchas situaciones críticas con agua de mar donde son necesarias tanto resistencia mecánica como resistencia a los cloruros.

Puesto que la CPT es función del material y del ambiente específico, es posible estudiar el efecto de cada elemento. Utilizando las CPT obtenidas por la Práctica A de ASTM G 48, se realizó un análisis de regresión estadística, a las composiciones de los aceros (considerando cada elemento como una variable independiente) frente a las CPT medidas (la variable dependiente). El resultado fue que sólo el cromo, molibdeno, wolframio y nitrógeno mostraron un consistente efecto medible sobre la CPT de acuerdo con la relación:

$$CPT = \text{constante} + \% Cr + 3,3 (\% Mo + 0,5 \% W) + 16 \% N$$

En esta relación, la suma de las cuatro variables de los elementos de aleación multiplicada por sus constantes de regresión se denomina habitualmente el Número Equivalente de Resistencia a las Picaduras (PREN). El coeficiente para el nitrógeno varía según los investigadores utilizándose los valores de 16, 22 y 30 (Ref. 8). El PREN resulta útil para clasificar

tipos dentro de una familia de aceros. Sin embargo, es necesario evitar una confianza excesiva en esta relación. Las “variables independientes” no eran realmente independientes debido a que los aceros ensayados tenían composiciones equilibradas. Las relaciones no son lineales y las relaciones cruzadas, como las sinergias del cromo y el molibdeno, se ignoraron. La relación supone un material procesado en condiciones ideales, pero no aborda el efecto de las fases intermetálicas, las fases no metálicas o el tratamiento térmico inadecuado que pueden afectar adversamente a la resistencia a la corrosión.

## 5.4 Resistencia a la corrosión bajo tensiones

Algunos de los primeros usos de los aceros inoxidable dúplex se basaron en su resistencia a la corrosión bajo tensiones (SCC) por cloruros. Comparados con los aceros inoxidable austeníticos con similar resistencia a la corrosión por picaduras e intersticios por cloruros, los inoxidable dúplex presentan una SCC mucho mejor. Muchos de los usos de los inoxidable dúplex en las industrias de procesos químicos son sustituyendo a los tipos de acero austeníticos en aplicaciones con un riesgo significativo de SCC. Sin embargo, al igual que con muchos materiales, los inoxidable dúplex pueden ser susceptibles al agrietamiento por corrosión bajo tensiones en ciertas condiciones. Esto puede producirse en ambientes de altas temperaturas, con presencia de cloruros, o cuando las condiciones favorecen el agrietamiento inducido por hidrógeno.

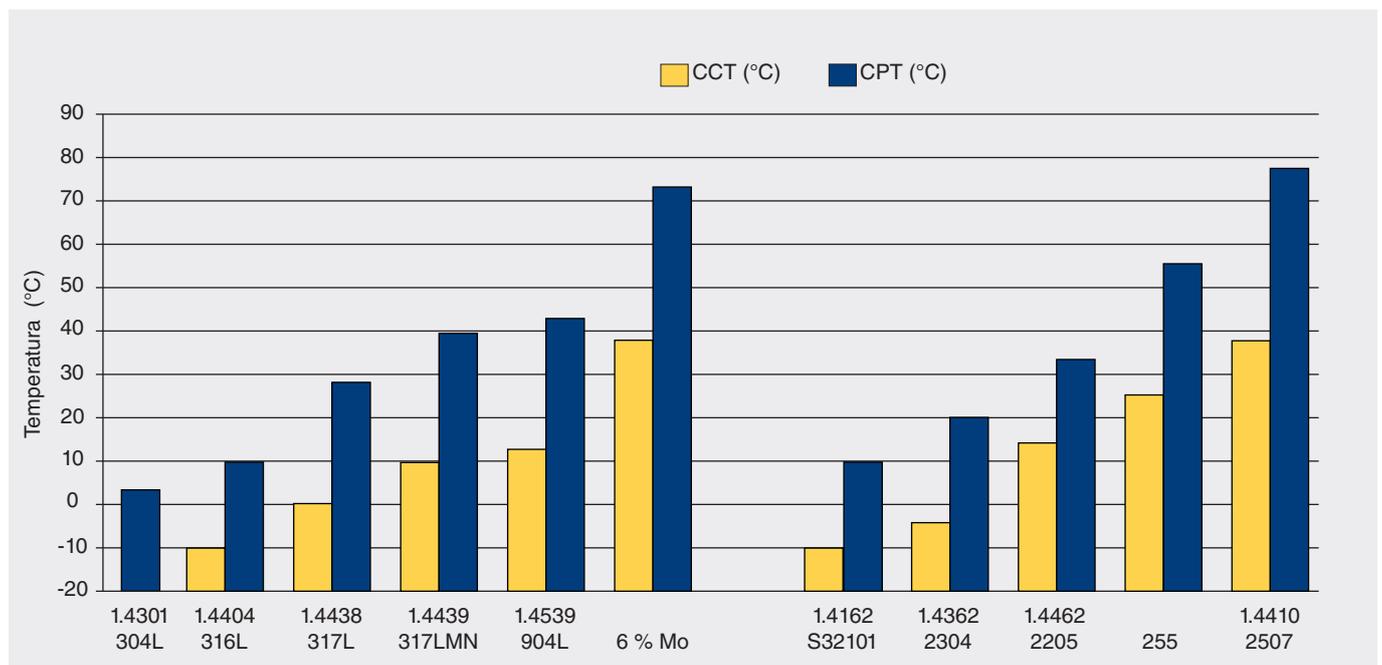


Figura 8: Temperaturas críticas de corrosión por picaduras y por intersticios para aceros austeníticos no soldados (lado izquierdo) y aceros inoxidable dúplex (lado derecho) en estado de recocido de solubilización (evaluado en cloruro férrico al 6 % según ASTM G 48)

Ejemplos de ambientes en los que puede esperarse SCC de aceros inoxidable dúplex son el ensayo de cloruro de magnesio al 42 % en ebullición, la evaporación de gotas cuando la temperatura del metal es elevada, y la exposición a sistemas acuosos de cloruros presurizados en los que la temperatura es mayor que la posible a presión atmosférica.

En la Figura 9 (Ref. 9) se ilustra la resistencia a la corrosión bajo tensiones por cloruros relativa de varios inoxidables austeníticos y dúplex recocidos en un ambiente de cloruros severo. El ensayo de evaporación de gotas utilizado para obtener estos datos es muy agresivo porque se efectúa a la alta temperatura de 120 °C (248 °F) y la solución de cloruro se concentra por evaporación. Los dos aceros dúplex mostrados, el EN 1.4462 (2205) y el EN 1.4410 (2507), se agrietarán finalmente en este ensayo a cierta fracción de su límite elástico, pero esta fracción es mucho más alta que la del inoxidable Tipo EN 1.4401 (AISI 316). Debido a su resistencia a la SCC en ambientes acuosos de cloruros a presión atmosférica, por ejemplo, corrosión bajo aislamientos, el uso de los inoxidables dúplex puede tenerse en cuenta en ambientes de agrietamiento por cloruros donde se sabe que los Tipos EN 1.4301 (AISI 304) y EN 1.4401 (AISI 316) se agrietan. La Tabla 4 resume el comportamiento al agrietamiento por corrosión bajo tensión por cloruros de diferentes aceros inoxidables en varios ambientes de ensayo con distintos niveles de severidad. Los



Tubos de acero inoxidable dúplex (Fuente: Butting)

ambientes del lado izquierdo de la tabla son severos por sus sales ácidas, los del lado derecho lo son por las altas temperaturas. La severidad de los ambientes del centro es menor. Los inoxidables austeníticos convencionales, con menos de 4 % de Mo, experimentan corrosión bajo tensiones por cloruros en todos estos ambientes, mientras que los inoxidables dúplex son resistentes en el intervalo medio en condiciones de ensayo moderadas.

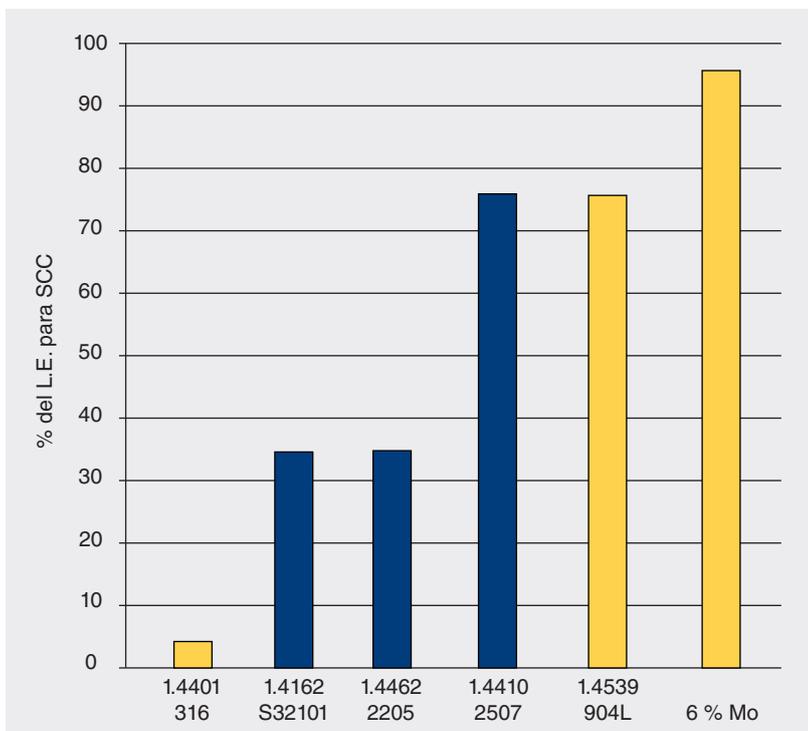


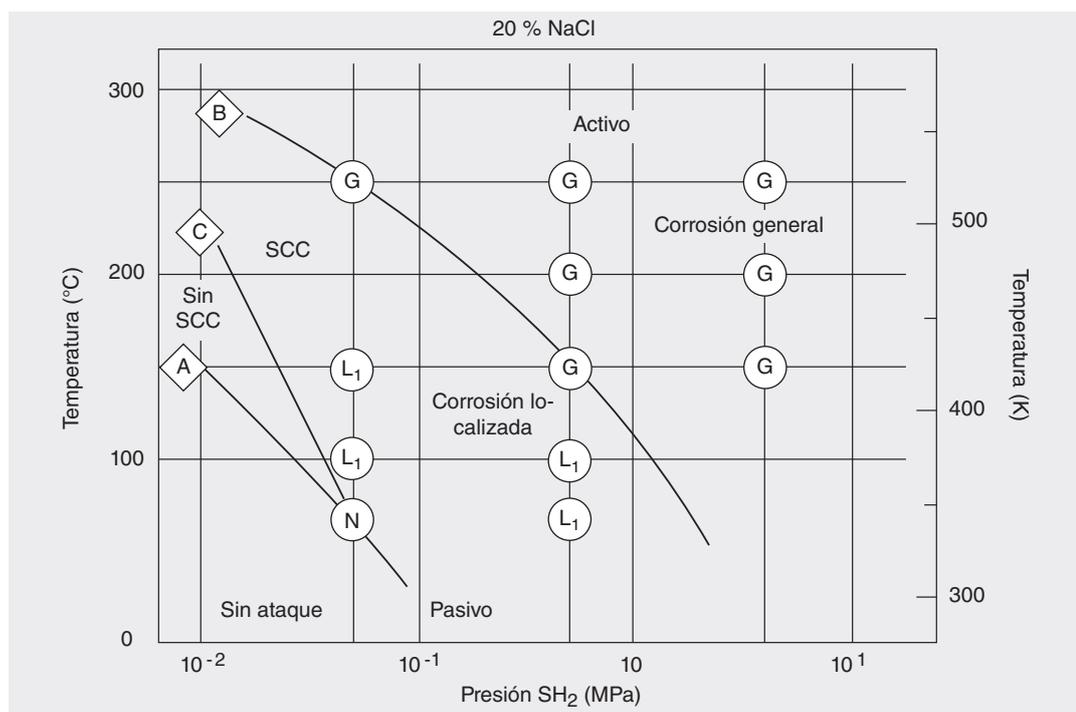
Figura 9: Resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión de aceros inoxidables austeníticos y dúplex recocidos en el ensayo de evaporación de gotas con soluciones de cloruro sódico a 120 °C (248 °F) (la tensión que provocó la fisuración se muestra como un porcentaje del límite elástico) (Fuente: Outokumpu).

La resistencia a la corrosión bajo tensiones inducida por hidrógeno es una función compleja, no sólo del contenido de ferrita, sino también de la resistencia mecánica, temperatura, condiciones de carga y tensión aplicada. A pesar de su susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno, por las ventajas de resistencia mecánica, los inoxidables dúplex se utilizan en ambientes con hidrógeno siempre que las condiciones de operación se evalúen y controlen cuidadosamente. La más notable de estas aplicaciones son las tuberías de alta resistencia manipulando mezclas de gas ligeramente sulfuroso y salmuera. En la Figura 10 (Ref. 10) se muestran condiciones de inmunidad y de susceptibilidad del EN 1.4462 (2205) en entornos sulfurosos con cloruro de sodio.

**Tabla 4: Comparación de la resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión de aceros inoxidable austeníticos y dúplex no soldados en ensayos de laboratorio acelerados (Fuente: diversas fuentes de literatura).**

Tipo	EN 1.4307 (AISI 304L) EN 1.4404 (AISI 316L)	3RE60	EN 1.4162 (S32101) EN 1.4062 (S32202)	EN 1.4462 (2205)	Dúplex 25 % Cr	Superdúplex
42 % Cl <sub>2</sub> Mg, hirviendo 154 °C doblado en U	■	■	■	■	■	■
35 % Cl <sub>2</sub> Mg, hirviendo 125 °C doblado en U	■	■	■	■	■	■
Evap. Gota 0.1M ClNa 120 °C 0,9x L.E.	■	■	■	■	■	■
Ensayo Wick 1500 ppm Cl como ClNa 100 °C	■	■	■	■	■	■
33 % Cl <sub>2</sub> Li hirviendo 120 °C doblado en U	■	■	■	■	■	■
40 % Cl <sub>2</sub> Ca 100 °C, 0,9x L.E.	■	■	■	■	■	■
25-28 % ClNa hirviendo 106 °C, doblado en U	■	■	■	■	■	■
26 % ClNa autoclave 155 °C, U-Biegeprobe	■	■	■	■	■	■
26 % ClNa autoclave 200 °C, doblado en U	■	■	■	■	■	■
600 ppm Cl (ClNa) autoclave 300 °C, doblado en U	■	■	■	■	■	■
100 ppm Cl (sal marina + O <sub>2</sub> ) autoclave 230 °C, doblado en U	■	■	■	■	■	■

■ Agrietamiento anticipado    
 ■ Agrietamiento posible    
 ■ Agrietamiento no anticipado    
 ■ Datos insuficientes



**Figura 10: Corrosión del acero inoxidable dúplex EN 1.4462 (2205) en ambientes de cloruro sódico-sulfuro de hidrógeno al 20 % según la predicción electroquímica y resultados experimentales.**

## 6 Especificaciones del Usuario Final y Control de Calidad

Una cuestión práctica crítica en las especificaciones y en el control de calidad de los productos de acero inoxidable dúplex es el mantenimiento de las propiedades después de la soldadura. Es esencial que el material de partida de acero inoxidable dúplex tenga la composición y sea procesado mediante un procedimiento cualificado para obtener buenas propiedades después de la soldadura.

### 6.1 Requisitos de ensayos normalizados

#### 6.1.1 Composición química

Las especificaciones ASTM o EN son el punto de partida apropiado para seleccionar un acero inoxidable dúplex de segunda generación. El nitrógeno es beneficioso, tanto para evitar un exceso de ferrita en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) como respecto a la mayor estabilidad metalúrgica. El límite superior de nitrógeno de un inoxidable dúplex es la solubilidad del nitrógeno en la masa fundida, lo que se refleja por el máximo del rango de nitrógeno requerido por las especificaciones. Sin embargo, el nitrógeno mínimo indicado puede o no reflejar el nivel necesario para proporcionar la mejor respuesta a la soldadura. Un ejemplo de esto es el S31803, la especificación original del 2205 (Ref. 11).

En el extremo inferior del rango 0,08–0,20 % permitido de N para el S31803, el 2205 no respondía adecuadamente al tratamiento térmico y a la soldadura. La experiencia práctica demostró que es necesario un “nitrógeno mínimo de 0,14 %” para las fabricaciones soldadas de 2205. Puesto que este requisito se especificaba con frecuencia, la versión S32205 del 2205 lo introdujo en su especificación para satisfacer a los usuarios finales que tengan que soldar. Los aceros inoxidables súper dúplex también tienen rangos de nitrógeno más altos, como reconocimiento de su importancia.

Ha habido algunas especificaciones de usuario final de aceros inoxidables dúplex basadas en la relación “PREN”. Si bien un valor de PREN puede ser eficaz para clasificar la resistencia a la corrosión de varios tipos de una familia con composiciones correctamente equilibradas, una composición modificada para cumplir un PREN específico no conduce necesariamente a un equilibrio metalúrgico correcto. El PREN puede ayudar para seleccionar un tipo, pero si se aplica a variaciones dentro de un tipo, sugiere que el cromo y el molibdeno son sustituibles por nitrógeno cuando, metalúrgicamente, el cromo y el

molibdeno promueven las fases ferrita e intermetálica, mientras que el nitrógeno promueve la austenita e inhibe la formación de las fases intermetálicas.

Por lo tanto, la selección de la composición para los tipos dúplex se basa mejor en los tipos normalizados listados en la especificación, posiblemente con una restricción del nitrógeno en el extremo superior del rango especificado para cada tipo. Cualquiera que sea la composición especificada, el material debería ser el mismo que el utilizado en la cualificación de los procedimientos de soldadura, para que las cualificaciones sean significativas respecto a los resultados que pueden esperarse del producto fabricado.

#### 6.1.2 Recocido de solubilización y enfriamiento

Además de la composición química, el estado de recocido real de los productos laminados también es importante para una adecuada respuesta a al soldadura. En los inoxidables austeníticos, el propósito del recocido es recristalizar el metal y poner el carbono en solución. Con los “tipos L” bajos en carbono, el acero inoxidable puede templarse en agua o al aire de manera relativamente lenta debido a que el tiempo para que se formen cantidades perjudiciales de carburos es bastante largo. Sin embargo, en el caso de los inoxidables dúplex, incluso con el contenido de nitrógeno ideal, las exposiciones durante pocos minutos en el rango de temperaturas crítico son perjudiciales para la corrosión y la tenacidad (Ref. 12). Cuando un producto laminado se enfría lentamente, el tiempo que tarda el material en pasar el rango de 700–980 °C (1300–1800 °F) ya no queda disponible para exposiciones térmicas adicionales, por ejemplo para la soldadura. Por ello, el soldador tendrá menos tiempo para realizar una soldadura libre de fases intermetálicas en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT).

Si bien algunas especificaciones ASTM permiten “el temple con agua o un enfriamiento rápido por otros medios” de algunos tipos de dúplex, la mejor condición metalúrgica para la soldadura se obtiene mediante el temple más rápido posible desde la temperatura de recocido. Lo anterior, sin embargo, ignora la deformación y el aumento de tensiones residuales inducidas por el temple con agua. En el caso de chapa fina el enfriamiento con aire es muy eficaz en las líneas modernas de procesamiento de bobinas. Pero con chapa gruesa, el temple con agua produce la mejor condición metalúrgica para la soldadura. Dejar enfriar una chapa o un accesorio en el rango de 700–980 °C (1300–1800 °F) antes del temple puede provocar la formación de fases intermetálicas.

Otro enfoque para asegurar unas condiciones iniciales óptimas, es requerir que los productos laminados se ensayen para conocer la ausencia de fases intermetálicas perjudiciales. ASTM A 923<sup>3</sup> utiliza el examen metalográfico, el ensayo de impacto o los ensayos de corrosión para demostrar la ausencia de un nivel perjudicial de fases intermetálicas. Este ensayo sólo considera si se ha producido la precipitación perjudicial. Las normas EN no incluyen ningún procedimiento de ensayo similar. Con este tipo de ensayos se verifica el procedimiento de fabricación para asegurar que no se forman fases intermetálicas perjudiciales durante el procesado. Este ensayo es análogo al ASTM A 262<sup>4</sup> o EN ISO 3651-2<sup>5</sup> de aceros inoxidable austeníticos para la sensibilización debida a la precipitación de carburos de cromo. ASTM A 923 sólo cubre el 2205 (S31803 y S32205), 2507, 255 y S32520, pero podrían añadirse otros tipos dúplex en el futuro. Muchos fabricantes han adoptado estos ensayos y otros similares, u otros criterios de aceptación, en la cualificación de sus procedimientos de soldadura.

## 6.2 Requisitos de ensayo especiales

### 6.2.1 Ensayos de tracción y de dureza

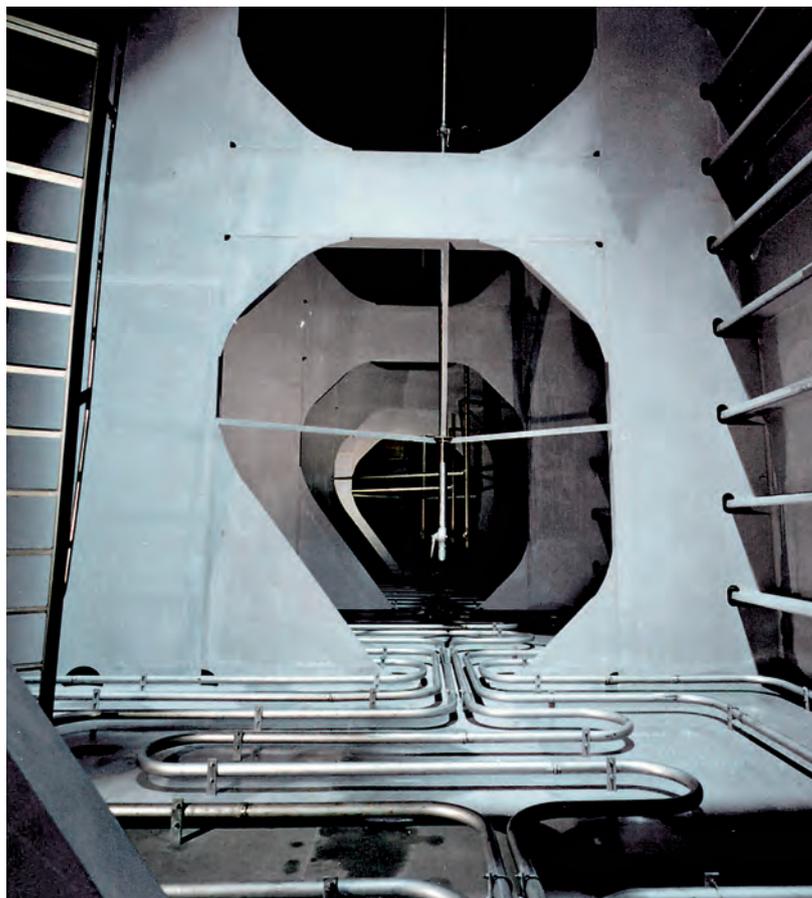
Los aceros inoxidable dúplex tienen una alta resistencia en comparación con los inoxidable austeníticos. Sin embargo, ha habido casos de especificaciones de usuarios finales en las que se ha impuesto un máximo a la resistencia o a la dureza. La imposición de máximos a la resistencia o a la dureza es posible que se deba a la experiencia con aceros inoxidable martensíticos, donde la resistencia o la dureza elevadas sean el resultado de martensita sin revenir. Los inoxidable dúplex, sin embargo, no forman martensita durante el enfriamiento. La alta resistencia y dureza de un inoxidable dúplex se deben al alto contenido de nitrógeno, la propia estructura dúplex y al endurecimiento por deformación que puede producirse en las operaciones de conformado o enderezado.

Los ensayos de dureza pueden ser un medio eficaz de demostrar que no ha habido un conformado en frío excesivo durante la fabricación; pero es importante que cuando se utilicen los ensayos de dureza con este propósito, la medición se efectúe a igual distancia de la superficie y del centro de la sección, y no sobre una superficie que pueda haberse endurecido de forma local y superficial.

### 6.2.2 Ensayos de doblado

Los ensayos de doblado pueden demostrar que los productos fabricados están libres de grietas de laminación, lo que puede ser difícil con secciones gruesas, piezas pequeñas o ciertas geometrías. Los ensayos de doblado no son una indicación conservadora de la calidad en los aceros inoxidable dúplex debido a que el punto de doblado puede no coincidir con la ubicación de unas características no aceptables. Algunas condiciones como las fases intermetálica centradas se detectan con poca probabilidad por la direccionalidad del doblado.

Los ensayos de doblado se utilizan habitualmente como parte de la cualificación de procedimientos de soldadura para los inoxidable austeníticos por el riesgo de agrietamiento en caliente de la soldadura, especialmente en estructuras de soldadura muy austeníticas fuertemente rigidizadas.



Interior de un depósito de EN 1.4462 (2205) en un buque cisterna de productos químicos (Fuente: ThyssenKrupp Nirosta)

- 3 Norma ASTM A 923 Métodos de ensayos para detectar fases intermetálicas perjudiciales en aceros inoxidable austeníticos/ferríticos dúplex
- 4 Norma ASTM A 262 Prácticas para la detección de la susceptibilidad al ataque intergranular en aceros inoxidable austeníticos
- 5 EN ISO 3651-2 Determinación de la resistencia a la corrosión intergranular de aceros inoxidable – Parte 2: Aceros inoxidable ferríticos, austeníticos y ferríticos-austeníticos (dúplex) – ensayo de corrosión en un medio conteniendo ácido sulfúrico

La utilidad de los ensayos de doblado para detectar problemas de integridad de las soldaduras se reduce en gran medida por la solidificación ferrítica del acero inoxidable dúplex, así como por la mayor conductividad térmica y menor expansión térmica. Los ensayos de doblado podrían detectar exceso de ferrita si la ubicación del ensayo coincidiese justo con la región afectada, pero es poco probable que detecten existencia de fases intermetálicas a los bajos niveles que se sabe son perjudiciales para la resistencia a la corrosión y la tenacidad de un producto.

### 6.2.3 Ensayos de impacto e inspección metalográfica para fases intermetálicas

Un ensayo de impacto puede utilizarse de dos maneras para especificar un material o cualificar un procedimiento:

- ensayar en condiciones conocidas para detectar material no aceptable, por ejemplo exceso de ferrita o presencia de fases intermetálicas;
- demostrar que una fabricación tiene las propiedades suficientes para el servicio previsto.

Para el primer caso, ASTM A 923 proporciona un ensayo para el 2205. La pérdida de tenacidad descrita en el Método B de ASTM A 923 es un ensayo Charpy longitudinal estándar, menos de 54 J (40 ft-lb) a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$  es una condición inaceptable para un producto laminado recocido. Para asegurar que el tratamiento térmico y el temple son satisfactorios, se debería requerir el Método B de ASTM A 923 (o el Método C, el ensayo de corrosión) por cada lote de colada de producto laminado para controlar la producción. Sin embargo, ASTM A 923 permite el uso del examen metalográfico (Método A), como un ensayo de discriminación rápida para aceptación pero no para rechazo. Debido a la gran competencia metalográfica necesaria para realizar el Método A, puede ser prudente que el usuario final solicite el ensayo de corrosión del Método C en lugar del examen metalográfico. Una manera de requerirlo es pedir que se informe del resultado de la velocidad de corrosión.

Una ventaja del Método A de ASTM A 923 es la identificación de la fase intermetálica como se muestra en la Figura 7 de ASTM A 923. La fase intermetálica descalifica un material en relación con el ensayo de discriminación por el Método A, pero no supone necesariamente el rechazo del material por el ensayo de impacto del Método B. Debido a que la fase intermetálica centrada puede provocar la delaminación de la chapa durante el conformado, corte térmico o soldadura, el usuario debería pedir que se efectúe el Método A además del Método B o C, y que se rechace cualquier material que muestre la fase intermetálica. Si bien ASTM A 923 indica que el Método A puede

no ser utilizado para rechazar, el usuario final puede imponer requisitos más estrictos. El material que muestre la fase intermetálica cerca del centro del espesor, según se indica en la Figura 7 de ASTM A 923, debe ser rechazado.

El segundo uso del ensayo de impacto, evaluación del metal base, zona de fusión y ZAT en condiciones más severas que las del servicio previsto, puede ser económico y conservador. Para la evaluación de soldaduras, tanto la temperatura de ensayo como el criterio de aceptación deben ser específicos para el tipo de soldadura y relevantes respecto a las condiciones de servicio. La tenacidad no será tan alta como la de un producto laminado de inoxidable dúplex con recocido de solubilización. La menor tenacidad del metal de soldadura no es necesariamente una indicación de fases intermetálicas, lo normal es que sea el resultado del incremento del contenido de oxígeno, especialmente en procedimientos de soldadura con fundente como protección.

ASME ha emitido nuevos requisitos aplicables a los aceros inoxidables dúplex con espesor superior a 9,5 mm (0,375 pulgadas) (Ref. 13). Estos requisitos utilizan ensayos de impacto Charpy a o por debajo de la temperatura mínima de diseño del metal (MDMT), con criterios de aceptación expresados como expansión lateral, para demostrar que el material de partida y las soldaduras de producción tienen la tenacidad suficiente para el servicio previsto. El ensayo ASME difiere del ASTM A 923 en que requiere que el ensayo Charpy consista de tres probetas (el enfoque más habitual para medir la tenacidad para la adecuación al servicio) y que se faciliten los resultados mínimos y medios. ASME requiere ensayar el metal base, el de soldadura y la ZAT para cada colada de material base y cada lote de metal de aporte.

Por economía del ensayo con resultados conservadores, se puede utilizar la más baja de las dos temperaturas de ensayo ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$  en ASTM A 923 o MDMT en el Código ASME), y medir la tenacidad tanto como energía de impacto como por expansión lateral en probetas por triplicado.

### 6.2.4 Equilibrio de fases determinado por metalografía o mediciones magnéticas

El equilibrio de las fases austenita-ferrita de los productos laminados de acero inoxidable dúplex muestra muy poca variación entre diferentes coladas y lotes, debido a que se fabrican con unos rangos de composición química muy estrechos y con unas prácticas de recocido bien definidas. Normalmente, el EN 1.4462 (2205) contiene un 40–50 % de ferrita. Por esta razón, la determinación del equilibrio de fases en los productos fabricados recocidos tiene poco valor.

Sin embargo, la determinación de la ferrita podría ser apropiada en la cualificación de procedimientos de soldadura para evitar un exceso de ferrita en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT). Normalmente la determinación precisa del equilibrio de fases de un inoxidable dúplex requiere examen metalográfico y conteo de puntos, por ejemplo ASTM E 562 (manual) o E 1245 (automático). Puesto que los inoxidables dúplex son ferromagnéticos con un espaciado excesivamente fino de austenita y ferrita, el uso de métodos de detección magnéticos ofrece una fiabilidad limitada sin normas de referencia de identidad geométrica y equilibrio de fases medido metalográficamente. AWS A4.2-91 y EN ISO 8249<sup>6</sup> describen procedimientos para la calibración de instrumentos magnéticos para medir la ferrita en soldaduras de acero inoxidable dúplex facilitando el resultado como Número de Ferrita, FN. El rango del equilibrio de fases aceptable para una soldadura es sustancialmente mayor que el del metal base. Si la tenacidad y resistencia a la corrosión de la soldadura y la ZAT son aceptables, de acuerdo con ensayos como ASTM A 923, un rango de ferrita del 25–75 % puede proporcionar las propiedades deseadas del acero inoxidable dúplex. Las mediciones magnéticas dentro del rango de FN 30–90 se consideran aceptables.

Requerir la determinación del equilibrio de fases de un material que ya está en servicio o el inventario de existencias, es más costoso que imponer el mismo requisito al material mientras se está fabricando en una acería. La obtención de la muestra y la realización de un ensayo independiente también pueden limitar la disponibilidad en el momento oportuno.

Puesto que las fases intermetálicas son no magnéticas, los ensayos magnéticos no pueden utilizarse para detectar las fases sigma y chi.

### 6.2.5 Ensayos de corrosión

Los ensayos de corrosión de productos laminados con recocido de solubilización, según el Método C de ASTM A 923, es uno de los métodos más económicos para detectar condiciones perjudiciales. La precipitación de fases intermetálicas, y posiblemente de nitruro de cromo en un equilibrio de fases excesivamente ferrítico, se detectan como pérdida de resistencia a las picaduras. Estas fases provocan pérdidas de 15 °C, o más, de la temperatura crítica de picaduras (CPT) normalmente esperada para el material recocido correctamente. La medición de la temperatura crítica de picaduras real de una probeta es relativamente cara porque requiere múltiples ensayos ASTM G 48 o ASTM G 150 en una sola probeta. Sin embargo, la realización de un único ensayo de corrosión (Método C de ASTM A 923) 10 a 15 °C por debajo de la CPT típica para un acero inoxidable dúplex revelará la presencia de fases perjudiciales.



**Instalación de barra de refuerzo de acero inoxidable dúplex en un tablero de puente de gran tamaño (Fuente: Hardesty & Hanover, LLP)**

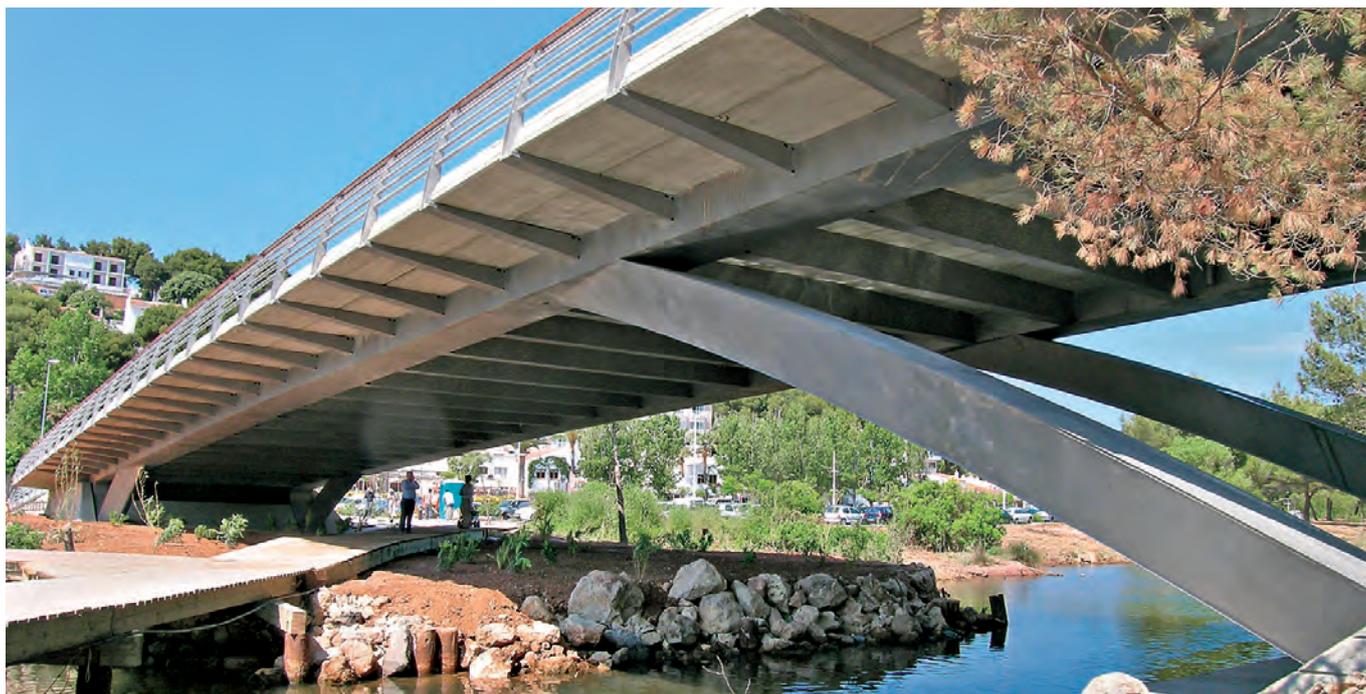
Cuando se utiliza un ensayo de corrosión para detectar presencia de fases perjudiciales, cualquier picadura en las caras o en los bordes debería incluirse como referencia de rechazo. Aunque el borde no esté expuesto en servicio, este ensayo está diseñado para detectar fases intermetálicas y es más probable que éstas se encuentren en el plano medio del espesor, que se evalúa cuando se incluye ataque del borde.

Antes del desarrollo de ASTM A 923, el ensayo de corrosión se solicitaba normalmente por referencia al “ensayo ASTM G 48 modificado”. Sin embargo, el G 48 es una descripción de procedimiento de investigación de laboratorio más que un ensayo de aceptación de material. Un requisito de ensayo G 48 no está completo sin determinar qué Práctica de G 48 va a efectuarse y establecer las otras variables de ensayo, incluyendo:

- preparación de la superficie,
- temperatura de ensayo,
- duración del ensayo,
- inclusión o exclusión de la corrosión de bordes,
- definición de un criterio de aceptación.

ASTM A 923 es un ensayo de aceptación diseñado para demostrar la ausencia de fases intermetálicas perjudiciales en productos laminados de forma económica y relativamente rápida. El Método C de ASTM A 923 expresa el criterio de aceptación como

<sup>6</sup> EN ISO 8249 Soldadura – determinación del número de ferrita (FN) en materiales de soldadura de acero inoxidable Cr-Ni austenítico y dúplex ferrítico-austenítico



Puente en Cala Galdana en Menorca fabricado con acero inoxidable dúplex EN 1.4462 (2205) (Fuente: PEDELTA)

velocidad de corrosión. Esto es algo que puede parecer sorprendente cuando en realidad se trata de detectar la corrosión por picaduras; sin embargo, este enfoque se utilizó por dos razones:

1. Al basar la aceptación en la pérdida de peso, se elimina la cuestión farragosa y potencialmente subjetiva de definir qué es una picadura en la superficie del metal. La pérdida de peso requerida para rechazar es lo bastante grande como para poderse medir fácilmente, pero lo bastante pequeña como para detectar fácilmente el tipo de picadura asociado a la presencia de fases intermetálicas en un ensayo de 24 horas.
2. Al utilizar una velocidad de corrosión, es posible someter a ensayo prácticamente cualquier tamaño o tipo de muestra siempre que pueda determinarse el área de superficie total.

El ensayo de corrosión es conservador y no es sensible a la geometría y ubicación de la probeta, a diferencia del ensayo Charpy que es sensible a la orientación y ubicación de la entalla. El ensayo de corrosión es apropiado como parte de la cualificación de procedimientos de soldadura y como ensayo de

control de calidad económico aplicado a muestras de soldaduras de producción cuando éstas pueden obtenerse. Sin embargo, es necesario definir una tolerancia por la diferencia de resistencia a la corrosión de los productos laminados recocidos y una unión en estado bruto de soldadura. Incluso una soldadura realizada correctamente puede mostrar una CPT de 5 °C a 15 °C menor que la del metal base, dependiendo del procedimiento de soldadura, gas de protección y tipo de acero inoxidable dúplex soldado.

### 6.2.6 Soldadura en producción e Inspección

Al soldador no le resulta fácil detectar los problemas que pueden producirse con el acero inoxidable dúplex, que tampoco son detectados por ensayos no destructivos. El soldador debe tener en cuenta que la calidad total de la soldadura, en base a su tenacidad y resistencia a la corrosión en servicio, depende del seguimiento estricto del procedimiento de soldadura. Las desviaciones del procedimiento cualificado no son necesariamente detectables en el taller, pero toda desviación supone un riesgo para un servicio seguro y económico.

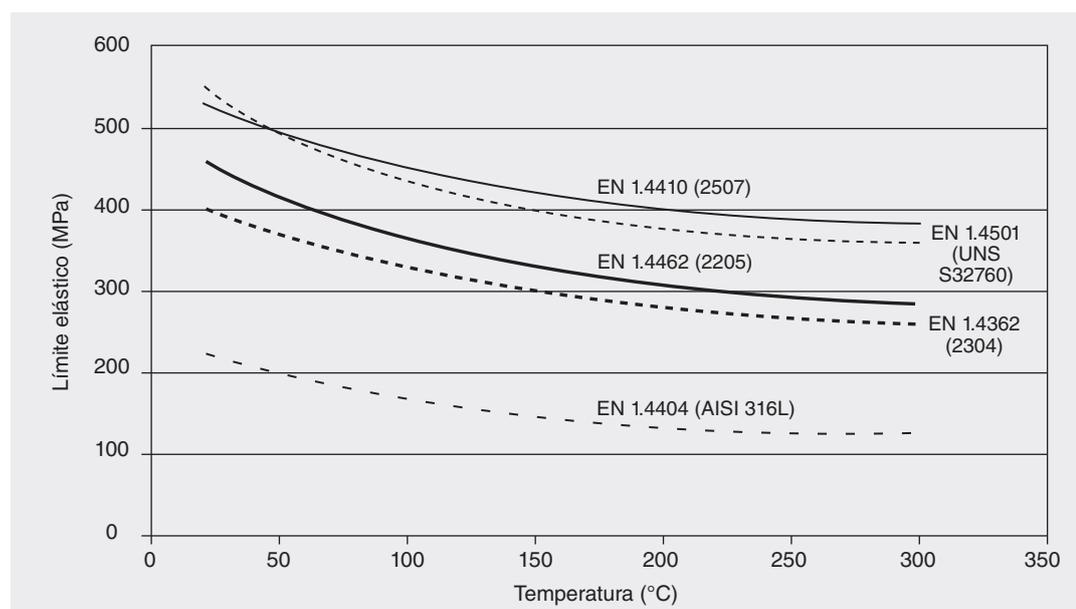
## 7 Propiedades Mecánicas

Los aceros inoxidable dúplex tienen propiedades mecánicas excepcionales. En la **Tabla 5** se indican para los tipos dúplex convencionales. Su límite elástico a temperatura ambiente en el estado de recocido de solubilización es más del doble del de los inoxidables austeníticos convencionales sin nitrógeno. Esto permite al ingeniero de diseño reducir el espesor en algunas aplicaciones. En la **Figura 11** se comparan los límites elásticos típicos de varios inoxidables dúplex con el inoxidable austenítico EN 1.4404 (AISI 316L) entre la temperatura ambiente y 300 °C (570 °F). Debido al peligro de fragilización a 475 °C (885 °F) de la fase ferrítica, los inoxidables dúplex no deben utilizarse en servicio a temperaturas por encima de las permitidas por el código de diseño de recipientes a presión aplicable durante períodos de tiempo prolongados (ver **Tabla 2**).

Las propiedades mecánicas de los inoxidables dúplex forjados son muy anisotrópicas, es decir, pueden variar dependiendo de la orientación. Esta anisotropía se debe a los granos alargados y textura cristalográfica resultantes del laminado en frío o en caliente (ver **Figura 2**). Si bien la estructura de solidificación del inoxidable dúplex es típicamente isotrópica, se lamina o forja y a continuación se recuece con las dos fases presentes. El aspecto de las dos fases en el producto final revela la direccionalidad del procesado. La resistencia es mayor perpendicularmente a la dirección de laminación. La tenacidad al impacto es mayor cuando la entalla está posicionada perpendicularmente a la dirección de laminación. La tenacidad medida es más alta para una probeta Charpy “longitudinal” (L-T) que en otras direcciones de ensayo. Normalmente la energía de impacto de una probeta transversal de una chapa de acero inoxidable dúplex será de 1/2 a 2/3 de la de una probeta longitudinal.

**Tabla 5: Límites mínimos de propiedades mecánicas en ASTM y EN para chapa de acero inoxidable dúplex**

Tipo	ASTM			EN				
	UNS No.	Límite elástico 0,2% MPa (ksi)	Carga de rotura MPa (ksi)	Alargamiento en 2" %	EN No.	Límite elástico aparente $R_{p0,2}$ MPa (ksi)	Carga de rotura $R_m$ MPa (ksi)	Alargamiento $A_5$ %
2304	S32304	400 (58)	600 (87)	25	1.4362	400 (58)	630 (91)	25
2205	S32205	450 (65)	655 (95)	25	1.4462	460 (67)	640 (93)	25
2507	S32750	550 (80)	795 (116)	15	1.4410	530 (77)	730 (106)	20



**Figura 11: Comparación del límite elástico típico de aceros inoxidables dúplex y el Tipo EN 1.4404 (AISI 316L) entre temperatura ambiente y 300 °C (572 °F) (Fuente: hojas de datos de fabricantes)**

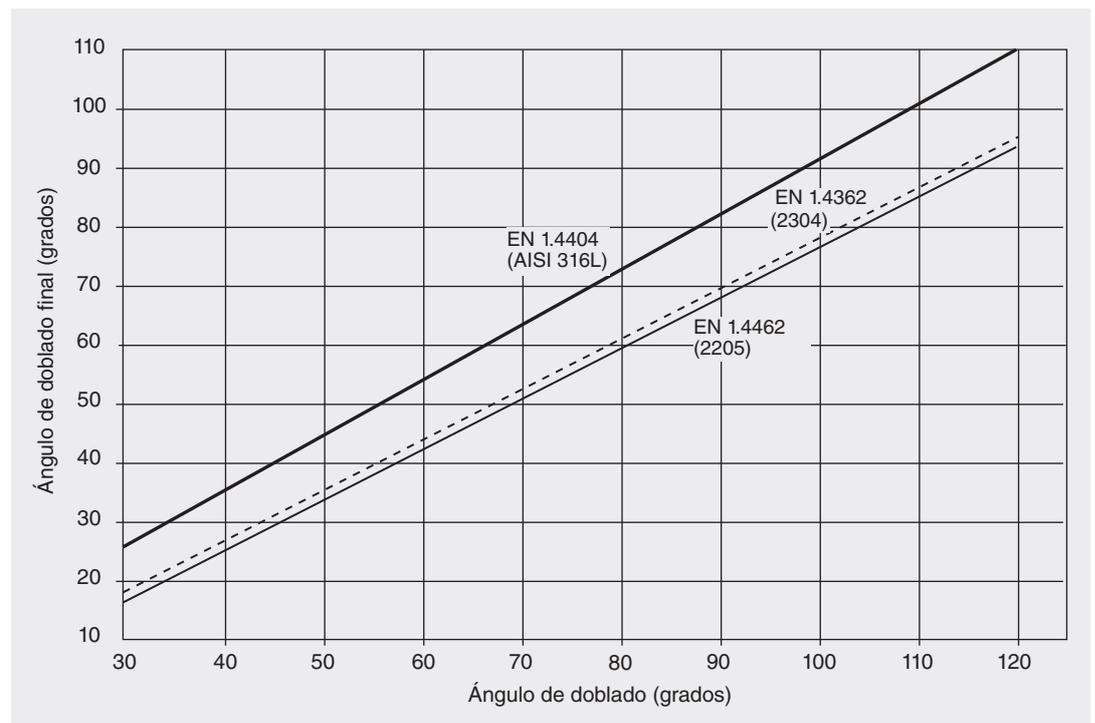
**Tabla 6: Comparación de la ductilidad de aceros inoxidable dúplex y austeníticos de acuerdo con los requisitos de ASTM A 240 y EN 10088-2**

ASTM A 240			EN 10088-2			
UNS No.	Tipo	Alargamiento, min. (%)	EN No.	Alargamiento, min. (%)*		
				P	H	C
S32003		25				
S32101		30	1.4162	30	30	30
S32202		30	1.4062			
S32304	2304	25	1.4362	25	20	20
S32205	2205	25	1.4462	25	25	20
S32750	2507	15	1.4410	20	15	15
S30403	304L	40	1.4307	45	45	45
S31603	316L	40	1.4404	45	40	40

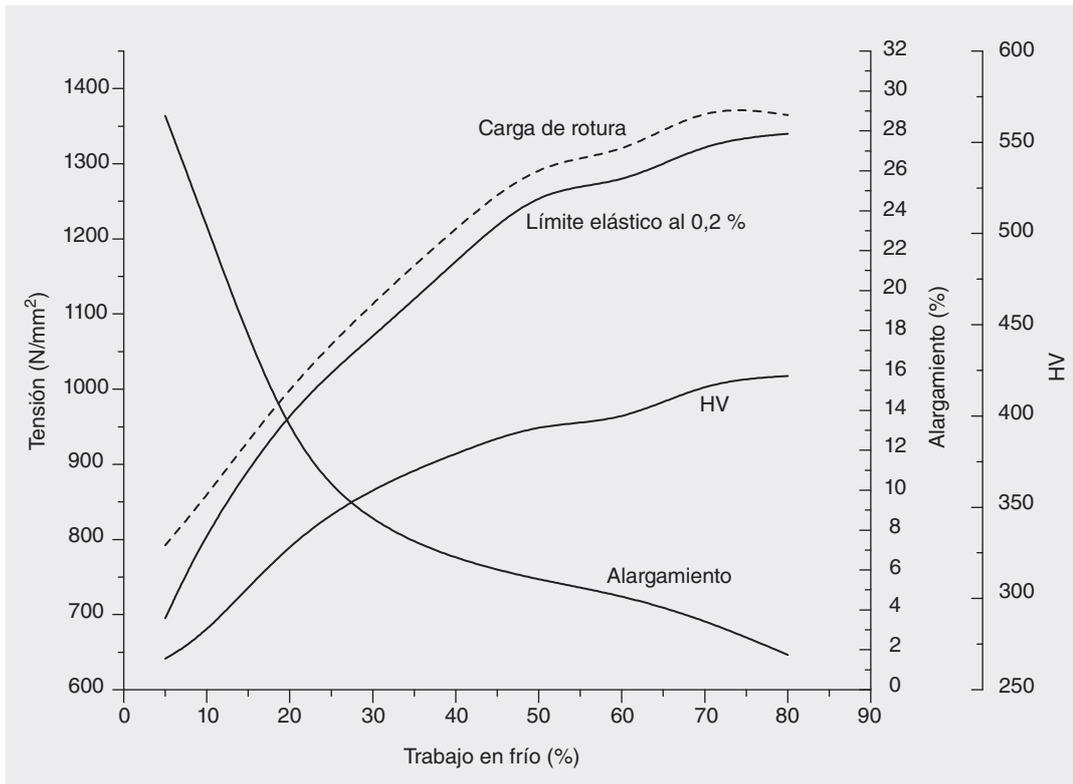
P = chapa gruesa laminada en caliente  
H = bobina laminada en caliente  
C = chapa y bobina laminadas en frío  
\* Dirección transversal

A pesar de su elevada resistencia, los aceros inoxidable dúplex tienen buena ductilidad y tenacidad. En comparación con el acero al carbono o con los inoxidable ferríticos, la transición dúctil-frágil es más gradual. Los aceros inoxidable dúplex mantienen buena ductilidad incluso a bajas temperaturas, por ejemplo -40 °C/ °F; sin embargo, la ductilidad y la tenacidad de los inoxidable dúplex son en general

menores que las de los inoxidable austeníticos. Los aceros inoxidable austeníticos normalmente no muestran una transición dúctil-frágil y mantienen una tenacidad excelente hasta temperaturas criogénicas. En la **Tabla 6** se compara el alargamiento mínimo en el ensayo de tracción para los aceros austeníticos convencionales y los inoxidable dúplex.



**Figura 12: Comparación de la recuperación elástica de aceros inoxidable dúplex y del tipo EN 1.4404 (AISI 316) en chapa de 2 mm (0,08 pulgadas) de espesor (Fuente: Outokumpu)**



**Figura 13: Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex EN 1.4462 (2205) (Fuente: Baosteel)**

Si bien el límite elástico del inoxidable dúplex puede permitir la reducción de espesor, dependiendo de las limitaciones de pandeo y del Módulo de Young, también puede presentar dificultades durante la fabricación. Debido a su mayor resistencia, la deformación plástica requiere mayores fuerzas. La recuperación elástica en las operaciones de doblado es mayor que con inoxidables austeníticos por las mayores fuerzas de doblado requeridas con los inoxidables dúplex. En la Figura 12 se compara la recuperación elástica de dos aceros inoxidables dúplex y del inoxidable austenítico Tipo EN 1.4404 (AISI 316L). Los inoxidables dúplex tienen menos ductilidad que los inoxidables austeníticos y podría ser necesario aumentar el radio de doblado para evitar el agrietamiento.

Debido a su mayor dureza y velocidad de endurecimiento por deformación, normalmente los inoxidables dúplex acortan la vida de las herramientas en las operaciones de mecanizado o requieren un aumento del tiempo de mecanizado en comparación con los tipos austeníticos convencionales. Pueden ser necesarios ciclos de recocido entre las operaciones de conformado o doblado debido a que la ductilidad de los inoxidables dúplex es aproximadamente la mitad que la de los inoxidables austeníticos. En la Figura 13 se muestra el efecto de deformación en frío sobre las propiedades mecánicas del EN 1.4462 (2205).



**Instalación de tubo de EN 1.4462 (2205) de 24 pulgadas aislado sobre elementos de soporte verticales en Prudhoe Bay (Fuente: Arco Exploration and Production Technology)**

## 8 Propiedades Físicas

En la **Tabla 7** se indican propiedades físicas a temperatura ambiente para algunos aceros inoxidable dúplex y en la **Tabla 8** los valores a diferentes altas temperaturas. Se incluyen los datos para acero al carbono e inoxidable austeníticos con fines de comparación.

En todos los casos, las variaciones en las propiedades físicas de los tipos dúplex son muy reducidas

reflejando, probablemente, diferencias en los procedimientos de ensayo. Todas las propiedades físicas de los tipos dúplex están entre las de los inoxidable austeníticos y las de los aceros al carbono, siendo más cercanas a las de los aceros inoxidable.

**Tabla 7: Propiedades físicas a temperatura ambiente de aceros inoxidable dúplex comparadas con las del acero al carbono y de los aceros inoxidable austeníticos (Fuente: hojas de datos de fabricantes)**

Tipo	UNS No.	Densidad		Calor específico		Resistividad eléctrica		Módulo de Young	
		g/cm <sup>3</sup>	lb./in <sup>3</sup>	J/kg K	Btu/lb./°F	micro Ω m	micro Ω in.	GPa	x10 <sup>6</sup> psi
Acero al carbono	G10200	7,64	0,278	447	0,107	0,10	3,9	207	30,0
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	7,98	0,290	502	0,120	0,73	28,7	193	28,0
EN 1.4401 (AISI 316)	S31600	7,98	0,290	502	0,120	0,75	29,5	193	28,0
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900	7,70	0,280	460	0,110	0,80	31,5	200	29,0
	S31500	7,75	0,280	482	0,115			200	29,0
	S32101	7,80	0,281	500	0,119	0,80	31,5	200	29,0
EN 1.4362 (2304)	S32304	7,75	0,280	482	0,115	0,80	31,5	200	29,0
	S31803	7,80	0,281	500	0,119	0,80	31,5	200	29,0
EN 1.4462 (2205)	S32205	7,80	0,281	500	0,119	0,80	31,5	200	29,0
	S31260	7,80	0,281	502	0,120			200	29,0
	S32750	7,85	0,285	480	0,114	0,80	31,5	205	29,7
255	S32550	7,81	0,282	488	0,116	0,84	33,1	210	30,5
	S39274	7,80	0,281	502	0,120			200	29,0
	S32760	7,84	0,281			0,85	33,5	190	27,6
	S32520	7,85	0,280	450	0,108	0,85	33,5	205	29,7
EN 1.4410 (2507)	S32750	7,79	0,280	485	0,115	0,80	31,5	200	29,0

**Tabla 8: Propiedades físicas de los aceros inoxidables dúplex a temperatura elevada comparadas con las del acero al carbono y de los aceros inoxidables austeníticos (Fuente: hojas de datos de fabricantes)**

Tipo	UNS No.	20 °C (68 °F)	100 °C (212 °F)	200 °C (392 °F)	300 °C (572 °F)	400 °C (754 °F)	500 °C (932 °F)
<b>Módulo elástico en tensión en función de la temperatura en unidades de GPa (ksi x 1.000)</b>							
Acero al carbono	G10200	207 (30,0)					
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	193 (28,0)	192 (27,9)	183 (26,6)	177 (25,7)	168 (24,4)	159 (23,0)
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900	200 (29,0)	195 (28,0)	185 (27,0)			
	S31500	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
	S32101	200 (29,0)	194 (28,0)	186 (27,0)	180 (26,1)		
EN 1.4362 (2304)	S32304	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
	S31803	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
EN 1.4462 (2205)	S32205	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
255	S32550	210 (30,5)	200 (29,9)	198 (28,7)	192 (27,8)	182 (26,4)	170 (24,7)
	S32520	205 (29,7)	185 (26,8)	185 (26,8)	170 (24,7)		
EN 1.4410 (2507)	S32750	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
<b>Coefficiente de dilatación térmica – desde 20 °C (68 °F) a T en unidades de 10<sup>-6</sup>/K (10<sup>-6</sup>/°F)</b>							
Acero al carbono	G10200	NA	12,1 (6,70)	13,0 (7,22)		14,0 (7,78)	
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	NA	16,4 (9,10)	16,9 (9,40)	17,3 (9,60)	17,6 (9,80)	18,0 (10,0)
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900	NA	10,9 (6,10)	11,0 (6,30)	11,6 (6,40)	12,1 (6,70)	12,3 (6,80)
	S31500	NA	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
	S32101	NA	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)		
EN 1.4362 (2304)	S32304	NA	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
	S31803	NA	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
EN 1.4462 (2205)	S32205	NA	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
255	S32550	NA	12,1 (6,72)	12,6 (7,00)	13,0 (7,22)	13,3 (7,39)	13,6 (7,56)
	S32520	NA	12,5 (6,94)	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)		
EN 1.4410 (2507)	S32750	NA	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
<b>Conductividad térmica en función de la temperatura en unidades de W/m K (Btu in/hr ft<sup>2</sup> °F)</b>							
Acero al carbono	G10200	52 (360)	51 (354)	49 (340)		43 (298)	
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	14,5 (100)	16,2 (112)	17,8 (123)	19,6 (135)	20,3 (140)	22,5 (155)
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900						
	S31500	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
	S32101	15,0 (105)	16,0 (110)	17,0 (118)	18,0 (124)		
EN 1.4362 (2304)	S32304	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
	S31803	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
EN 1.4462 (2205)	S32205	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
255	S32550	13,5 (94)	15,1 (105)	17,2 (119)	19,1 (133)	20,9 (145)	22,5 (156)
	S32520	17,0 (118)	18,0 (124)	19,0 (132)	20,0 (138)		
EN 1.4410 (2507)	S32750	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)

## 9 Corte

Para cortar aceros inoxidable dúplex pueden utilizarse los mismos procesos que normalmente se aplican para los inoxidables austeníticos y los aceros al carbono, siendo necesario efectuar algunos ajustes en los parámetros para compensar las diferencias de las propiedades mecánicas y la respuesta térmica.

### 9.1 Corte con sierra mecánica

Debido a su elevada resistencia, alta velocidad de endurecimiento por deformación y a la ausencia virtual de inclusiones que pudieran actuar como rompe virutas, los inoxidables dúplex son más difíciles de aserrar que los aceros al carbono. Los mejores resultados se obtienen con máquinas potentes, sistemas de alineación de cuchilla robustos, cuchillas de dientes gruesos, velocidades de corte de lentas a moderadas, grandes avances y abundante caudal de refrigeración, idealmente una emulsión sintética que facilite lubricación y refrigeración, suministrado de manera que la cuchilla lleve el refrigerante a la pieza. Las velocidades de corte y las alimentaciones deben ser similares a las utilizadas para el inoxidable austenítico del Tipo EN 1.4401 (AISI 316).

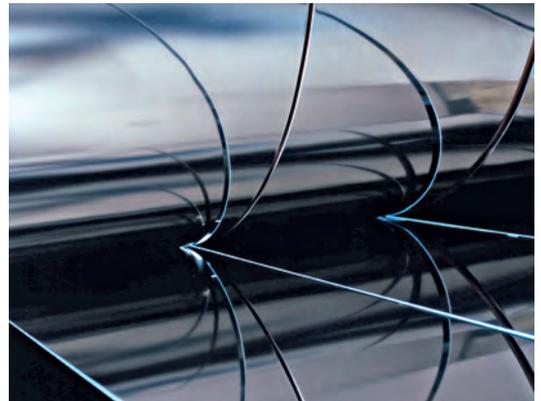
### 9.2 Corte con cizalla

Los aceros inoxidables dúplex se cizallan con el mismo equipo utilizado para los Tipos EN 1.4301 (AISI 304) y EN 1.4401 (AISI 316), normalmente sin realizar ajustes especiales. Sin embargo, debido a la mayor resistencia a la cortadura de los inoxidables dúplex, la cizalla debe ser más potente o reducirse el espesor a cizallar.

La resistencia a la cortadura de los aceros inoxidables es de aproximadamente el 58 % de la carga de rotura para chapa laminada en caliente y chapa laminada en frío. Los inoxidables dúplex se comportan como lo haría una pieza más gruesa de inoxidable Tipo EN 1.4401 (AISI 316), dependiendo de la relación de sus resistencias a la cortadura reales. Por ello, el espesor máximo de inoxidable dúplex EN 1.4362 (2304) o EN 1.4462 (2205) que puede cortarse en una cizalla específica es, aproximadamente, el 85 % del espesor del Tipo EN 1.4301 (AISI 304) o EN 1.4401 (AISI 316). El espesor máximo de los inoxidables súper dúplex que puede cortarse en una cizalla específica es, aproximadamente, el 65 % del de estos tipos austeníticos comunes.

### 9.3 Corte longitudinal

Para cortar bandas o chapas de acero inoxidable dúplex bobinado se utilizan cortadoras de flejes convencionales. El acero inoxidable bobinado se alimenta desde un carrete a través de un eje superior e inferior en la línea de corte de flejes que contiene cuchillas circulares y en otro carrete se rebobinan los flejes cortados. La posición de las cuchillas de corte puede



Corte de flejes de acero inoxidable dúplex  
(Fuente: ThyssenKrupp Nirosta)

ajustarse en base a los diferentes anchos de fleje deseado. Debido a la mayor resistencia de los inoxidables dúplex en comparación con los inoxidables austeníticos, el desgaste de la cuchilla cortadora de flejes y la consistencia de los bordes de corte son más difíciles de controlar. El mantenimiento de una buena calidad de los bordes de corte de las bobinas de inoxidable dúplex requiere el uso de cuchillas cortadoras de carburo o de acero para herramientas.

### 9.4 Punzonado

El punzonado puede considerarse como una forma difícil de cizallado. La alta resistencia, rapidez de endurecimiento por deformación y resistencia al desgarre hacen que los inoxidables dúplex sean relativamente difíciles de punzonar y abrasivos para el utillaje. La experiencia con esta operación es limitada, pero la directriz de que el inoxidable dúplex se comportará como un inoxidable austenítico de doble espesor es un buen punto de partida. Los inoxidables dúplex más aleados con altos contenidos de nitrógeno son mucho más difíciles de trabajar.

### 9.5 Corte por plasma y láser

Los aceros inoxidables dúplex se procesan rutinariamente con los mismos equipos de corte por plasma y por láser que los inoxidables austeníticos. La ligeramente mayor conductividad térmica y el típico menor contenido de azufre de los inoxidables dúplex, pueden afectar ligeramente los parámetros óptimos, pudiéndose conseguir resultados aceptables sin ningún ajuste especial. La Zona Afectada Térmicamente (ZAT) por el proceso de corte por plasma es normalmente estrecha, unos 0,25 mm (0,010 pulgadas), debido a que el corte se efectúa rápidamente, en una pasada y con rápido enfriamiento de la chapa. El mecanizado normal de una preparación de soldadura y la fusión del metal base adyacente durante la soldadura eliminará la ZAT por el proceso de corte por plasma.

# 10 Conformado

## 10.1 Conformado en caliente

Los aceros inoxidables dúplex se comportan muy bien durante el conformado en caliente con cargas relativamente bajas hasta unos 1230 °C (2250 °F). Sin embargo, si el conformado se realiza a una temperatura demasiado baja, se acumula deformación en la más débil pero menos dúctil ferrita, posibilitando su agrietamiento en la región deformada. También puede que se precipite gran cantidad de fase sigma cuando la temperatura de trabajo es demasiado baja.

La mayoría de los fabricantes recomiendan una temperatura máxima de conformado en caliente entre 1100 °C (2000 °F) y 1150 °C (2100 °F). Este límite superior de temperatura se sugiere debido al efecto de las altas temperaturas en la estabilidad dimensional de la pieza y al incremento de la tendencia de formación de cascarilla con el aumento de la temperatura. A temperaturas elevadas, el inoxidable dúplex se vuelve blando y las piezas fabricadas, como fondos de recipientes o tuberías, se alabean o comban en el horno si no se sujetan. A estas temperaturas el acero también puede volverse demasiado blando para ciertos conformados en caliente. La **Tabla 9** resume los rangos de temperatura recomendados para el conformado en caliente y las temperaturas mínimas de homogenización. No es necesario, aunque es siempre recomendable, iniciar el conformado en caliente a la temperatura más alta del rango. Sin embargo, el acero debería con anterioridad haber alcanzado al menos la temperatura mínima de homogenización. El horno debería cargarse caliente para evitar el calentamiento lento en el rango de temperaturas que se forma la fase sigma.

La uniformidad de la temperatura es importante para un satisfactorio conformado en caliente del inoxidable

dúplex. Si la forma de la pieza no es compacta, los bordes podrían estar significativamente más fríos que el cuerpo, existiendo riesgo de agrietamiento de estas regiones más frías. Para evitar este agrietamiento, es necesario recalentar la pieza cuando exista el riesgo de que zonas localizadas se enfríen por debajo de la temperatura mínima de trabajo en caliente. El extremo inferior del rango de temperaturas de conformado en caliente sugerido puede ampliarse en cierta medida, pero sólo si se mantiene la uniformidad de temperatura en la pieza, especialmente en los bordes o secciones más delgadas.

En el caso de secciones gruesas, es apropiado considerar si el temple con agua es lo bastante rápido para evitar la precipitación de fases intermetálicas. Para chapas gruesas, el límite de espesor es de 150–200 mm (6–8 pulgadas) para chapa de EN 1.4462 (2205) forjada y de 75–125 mm (3–5 pulgadas) para chapa súper dúplex forjada, los límites exactos varían con la composición del inoxidable dúplex y el rendimiento de los equipos de temple. Para una forma cilíndrica sencilla, el límite de diámetro es de unos 375 mm (15 pulgadas). Si la pieza acabada va a tener un orificio interno pasante, el enfriamiento de la pieza después del recocido final se mejora significativamente cuando se perfora o mecaniza este orificio antes del tratamiento térmico final.

### 10.1.1 Recocido de solubilización

Después del conformado en caliente, es necesario efectuar un recocido de solubilización completo seguido de un temple rápido para restaurar totalmente las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión. La temperatura de la pieza debe ser superior a la mínima de recocido de solubilización y mantenerse el tiempo suficiente para disolver cualquier precipitado

**Tabla 9: Rango de temperaturas de conformado en caliente y temperatura mínima de homogenización para aceros inoxidables dúplex (los tipos austeníticos comunes se incluyen con fines comparativos) (Fuente: hojas de datos de fabricantes)**

Tipo	UNS No.	EN No.	Rango de temperatura de conformado en caliente		Temperatura mínima de homogenización	
			°C	°F	°C	°F
	S32101	1.4162	1100 a 900	2000 a 1650	950	1750
2304	S32304	1.4362	1150 a 950	2100 a 1740	980	1800
2205	S32205	1.4462	1230 a 950	2250 a 1740	1040	1900
2507	S32750	1.4410	1230 a 1025	2250 a 1875	1050	1920
	S32520	1.4507	1230 a 1000	2250 a 1830	1080	1975
	S32760	1.4501	1230 a 1000	2250 a 1830	1100	2010
304	S30400	1.4301	1205 a 925	2200 a 1700	1040	1900
316	S31600	1.4401	1205 a 925	2200 a 1700	1040	1900

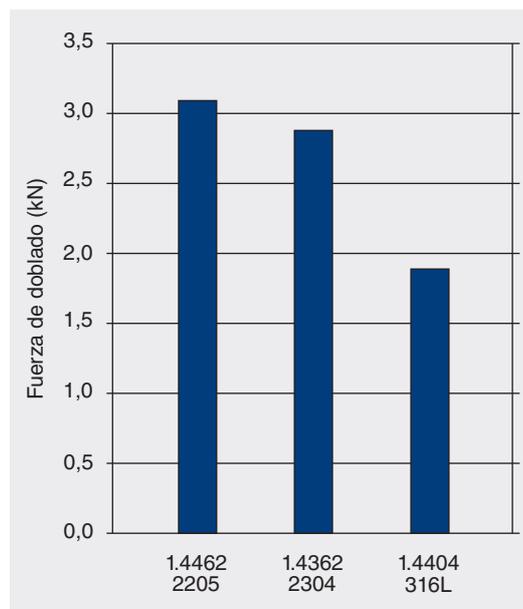
intermetálico. Una directriz conservadora es que el tiempo de permanencia a temperatura debería ser comparable al tiempo total que estuvo en el rango de 650–980 °C (1200–1800 °F) durante el proceso de conformado en caliente. La pieza debería templarse con agua desde la temperatura de solubilización. No debe permitirse que pasen varios minutos en el rango de 700–1000 °C (1300–1830 °F) mientras se traslada a donde se vaya a temprar después de este recocido final. En la **Tabla 10** se resumen las temperaturas mínimas de recocido de solubilización para los aceros inoxidable dúplex.

A las temperaturas de recocido de solubilización, los inoxidables dúplex son bastante blandos y es probable que se alabeen o distorsionen si la pieza no se apoya adecuadamente. Éste puede ser un problema importante con los productos tubulares, especialmente con grandes diámetros y espesores delgados. El reformado o enderezado de los productos dúplex alabeados es más difícil que el de los inoxidables austeníticos debido a su mayor resistencia a temperatura ambiente. Es posible que los intentos de minimizar esta deformación, con tiempos de recocido cortos, calentamiento lento en el rango de temperaturas del recocido o el uso de temperaturas de recocido menores que las recomendadas, no disuelvan las fases intermetálicas o provoquen la formación de cantidades adicionales de estas fases. Esto reducirá la resistencia a la corrosión y la tenacidad.

El tratamiento de alivio de tensiones para reducir el conformado en frío durante el conformado o el enderezado no es aconsejable. Los aceros inoxidables dúplex tienen inherentemente muy buena resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión por cloruros,

**Tabla 10: Temperaturas mínimas de recocido de solubilización para aceros inoxidables dúplex (Fuente: hojas de datos de fabricantes y ASTM A 480)**

Tipo	UNS No.	Temperatura de recocido mínima	
		°C	°F
EN 1.4362 (2304)	S32304	980	1800
	S32003	1010	1850
	S32001	1040	1900
	S32101	1020	1870
	S32202	980	1800
	S82011	1010	1850
EN 1.4462 (2205)	S32205	1040	1900
	S32506	1020 a 1120	1870 a 2050
	S32520	1080 a 1120	1975 a 2050
255	S32550	1040	1900
EN 1.4410 (2507)	S32750	1025 a 1125	1880 a 2060
	S32760	1100	2010



**Figura 14: Fuerza mínima necesaria para iniciar la deformación plástica en el doblado de probetas de EN 1.4362 (2304), EN 1.4462 (2205) y 1.4404 (AISI 316L) de 50 mm (2 pulgadas) de ancho y 2 mm (0,08 pulgadas) de espesor (Fuente: Outokumpu)**

que sólo puede mejorarse ligeramente reduciendo el trabajo en frío residual. No hay ninguna temperatura adecuada, por debajo de la de recocido de solubilización, a la que pueda realizarse el alivio de tensiones sin peligro de formación de fases intermetálicas que reducirían la resistencia a la corrosión y la tenacidad.

## 10.2 Conformado a media temperatura

En ocasiones es útil calentar un poco una pieza de acero para ayudar en las operaciones de conformado. Sin embargo, el calentamiento prolongado de los aceros inoxidables dúplex por encima de 315 °C (600 °F) puede provocar cierta pérdida de tenacidad a temperatura ambiente o de resistencia a la corrosión debido a la fragilización 475 °C (885 °F) (ver Figura 5). A temperaturas más elevadas existe el riesgo de precipitación de fases intermetálicas de forma más rápida y perjudicial. Como estas fases no interfieren con el proceso de conformado, es posible calentar los inoxidables dúplex para conformarlos. Sin embargo, cuando la temperatura de trabajo es superior a unos 300 °C (570 °F), el conformado a media temperatura debería ir seguido de un recocido de solubilización completo y un temple rápido (ver Tabla 10).

## 10.3 Conformado en frío

Los aceros inoxidables dúplex han demostrado buen comportamiento al conformado en diversos productos. La mayoría de las aplicaciones de los inoxidables dúplex requieren un conformado relativamente simple, como el cilindrado, estampación y conformado de fondos de cabezas de tanques y de recipientes por estampación o laminado. En la mayoría de estas

aplicaciones, un problema fundamental es la alta resistencia de los inoxidables dúplex y la potencia de los equipos de conformado. Una primera estimación es que un inoxidable dúplex responderá al conformado de manera similar a la de un tipo austenítico de la serie 300 de doble de espesor. En la **Figura 14** se compara la fuerza mínima necesaria para iniciar la deformación plástica en el doblado de varios aceros inoxidables. Reducciones de espesor son posibles con inoxidables dúplex, aunque serán inferiores a las esperadas como resultado del incremento del límite elástico. Incluso si los equipos tienen la potencia suficiente, es necesario considerar tolerancias para una mayor recuperación elástica debida a la elevada resistencia de los tipos dúplex (ver la **Figura 12**).

La menor ductilidad de los inoxidables dúplex, en comparación con el inoxidable austenítico, también debe tenerse en cuenta. En la mayoría de las especificaciones los tipos dúplex tienen un alargamiento mínimo requerido del 15 al 30 %, en comparación con el 40 % de alargamiento mínimo requerido para muchos tipos austeníticos. Si bien los alargamientos reales pueden ser algo mayores, la relación sugerida por estos mínimos es apropiada y una buena guía para las operaciones de conformación en frío. Los tipos dúplex requieren un radio de doblado mayor que los tipos austeníticos, o necesitan un recocido intermedio para un conformado severo o complejo debido a su menor ductilidad.

## 10.4 Conformado en prensa

Los aceros inoxidables dúplex se conforman fácilmente en prensa. En muchos casos, sin embargo, el inoxidable dúplex se utiliza como sustituto optimizado de piezas de inoxidable austenítico, acero al carbono o un inoxidable ferrítico. El primer intento se suele efectuar sin modificar el espesor. Si bien la mayor resistencia del tipo dúplex justificaría una reducción del espesor, el coste del rediseño podría anular las ventajas de ahorro de coste y de peso. En la mayoría de los casos la reducción del espesor facilitaría el conformado. Sin embargo, en los intentos iniciales de conformado de un inoxidable dúplex se considera que ello conlleva una cierta "dificultad".

Cuando se compara con el conformado del acero al carbono o del inoxidable ferrítico, los problemas se centran casi exclusivamente en la resistencia y en la recuperación elástica. El límite elástico de los inoxidables dúplex es aproximadamente un 30–50 % superior. Los aceros ferríticos sólo muestran un endurecimiento por deformación limitado y la carga de trabajo puede ser relativamente baja. Los inoxidables dúplex parten de una resistencia elevada y se endurecen progresivamente, por lo que la recuperación elástica será un problema. Por otra parte, la ductilidad de los inoxidables dúplex es mayor y el exceso de doblado podría compensar la recuperación elástica. Además, en comparación con los aceros ferríticos, los inoxidables dúplex son menos sensibles a la dirección de doblado respecto a la dirección de

laminación. Los inoxidables dúplex muestran cierta anisotropía de las propiedades mecánicas debido al laminado de la estructura dúplex, pero su efecto práctico es menor que con los aceros ferríticos debido a la mayor ductilidad de los dúplex.

El conformado de chapa de inoxidable ferrítico tiene, en muchos casos, ventajas en la embutición profunda. En esta operación la chapa se deforma en su plano con un adelgazamiento mínimo a medida que es llevada al interior del molde. En los inoxidables ferríticos, este tipo de conformado se ve mejorado en gran medida por el desarrollo de la textura metalográfica. Se ha prestado poca atención a este comportamiento con chapa de inoxidable dúplex, pero no parece probable que pueda conseguirse el mismo comportamiento favorable con la estructura dúplex. Es probable que la tecnología de la embutición profunda para el inoxidable dúplex sea significativamente diferente de la del acero ferrítico o el inoxidable austenítico.

En el caso más frecuente, cuando los inoxidables dúplex se comparan con los inoxidables austeníticos, los ajustes deben considerar la mayor resistencia y la menor ductilidad de los tipos dúplex. Las propiedades de conformado por estirado de los inoxidables dúplex están limitadas por la fase ferrita y no poseen el elevado endurecimiento por deformación que permite a los inoxidables austeníticos ser tan frecuentemente estirados.

## 10.5 Repulsado

La resistencia mecánica y a la corrosión de los aceros inoxidables dúplex, especialmente al agrietamiento por corrosión bajo tensión en presencia de cloruros, los hacen candidatos para aplicaciones en piezas giratorias como centrifugadoras. El repulsado es un método económico y utilizado con frecuencia para fabricar estas piezas.

El repulsado es una operación compleja que depende de forma significativa de los equipos y de la habilidad del operador. Los inoxidables austeníticos se repulsan regularmente, pero con frecuencia requieren múltiples tratamientos de recocido intermedios para restaurar la ductilidad durante la secuencia del conformado. La experiencia limitada en el repulsado de inoxidables dúplex indica que las cargas de conformado son muy altas, especialmente cuando no se efectúa reducción del espesor en relación con los inoxidables austeníticos. Con un equipo de potencia y fuerza suficientes, los tipos dúplex se repulsan bien, pero su menor ductilidad puede requerir recocidos intermedios más frecuentes que con los tipos austeníticos. La planeidad y la minimización de la "corona" del producto de partida son importantes para la respuesta al repulsado. Sin embargo, el aplanado mecánico fuerte, por ejemplo mediante nivelado con rodillos, puede agotar una parte de la ductilidad para la primera etapa del repulsado. Algunos componentes de inoxidable dúplex se han repulsado a temperaturas superiores a 650 °C (1200 °F) con el subsiguiente recocido de solubilización completo.

# 11 Mecanizado de los Aceros Inoxidables Dúplex

Los aceros inoxidable dúplex tienen aproximadamente el doble de límite elástico que los tipos austeníticos sin nitrógeno y su velocidad de endurecimiento por deformación inicial es como mínimo comparable con la de los tipos austeníticos comunes. La viruta que se forma durante el mecanizado de los inoxidable dúplex es fuerte y abrasiva para el utillaje, especialmente en el caso de los tipos dúplex de alta aleación. Puesto que los inoxidable dúplex se producen con el menor contenido de azufre posible, poco se puede hacer para facilitar la rotura de las virutas.

Por estas razones los inoxidable dúplex son, normalmente, más difíciles de mecanizar que los inoxidable austeníticos de la serie 300 con similar resistencia a la corrosión. Son necesarias fuerzas de corte mayores y es normal que las herramientas se desgasten más rápidamente en el mecanizado de los inoxidable dúplex. La mayor dificultad de mecanización en comparación con los austeníticos es más evidente cuando se utilizan herramientas de carburo. Esto se ilustra en la Figura 15 con una comparación de índices de mecanización relativos para algunos inoxidable dúplex y el Tipo EN 1.4401 (AISI 316). Puede verse el mayor índice de mecanización del inoxidable dúplex de baja aleación, S32101, comparado con el inoxidable 316.

## 11.1 Directrices generales para el mecanizado de los aceros inoxidable dúplex

Las siguientes directrices de mecanizado son generalmente aplicables a todos los aceros inoxidable, pero su importancia es aún mayor en los inoxidable dúplex.

- Utilizar máquinas potentes y rígidas, el montaje de las herramientas y de la pieza debe ser muy fuerte y rígido. (Las fuerzas de corte para cortes similares serán normalmente mucho mayores para los inoxidable dúplex que las correspondientes para los inoxidable austeníticos).
- Minimizar las vibraciones manteniendo el voladizo de la herramienta lo más corto posible.
- No utilizar un radio de punta de cuchilla mayor del necesario.
- Favorecer una geometría de bordes para los carburos que proporcione un borde "afilado" sin menoscabo de la resistencia adecuada.
- Diseñar las secuencias de mecanizado de manera que la profundidad de corte este siempre por debajo de la capa endurecida por deformación resultante de pasadas anteriores.

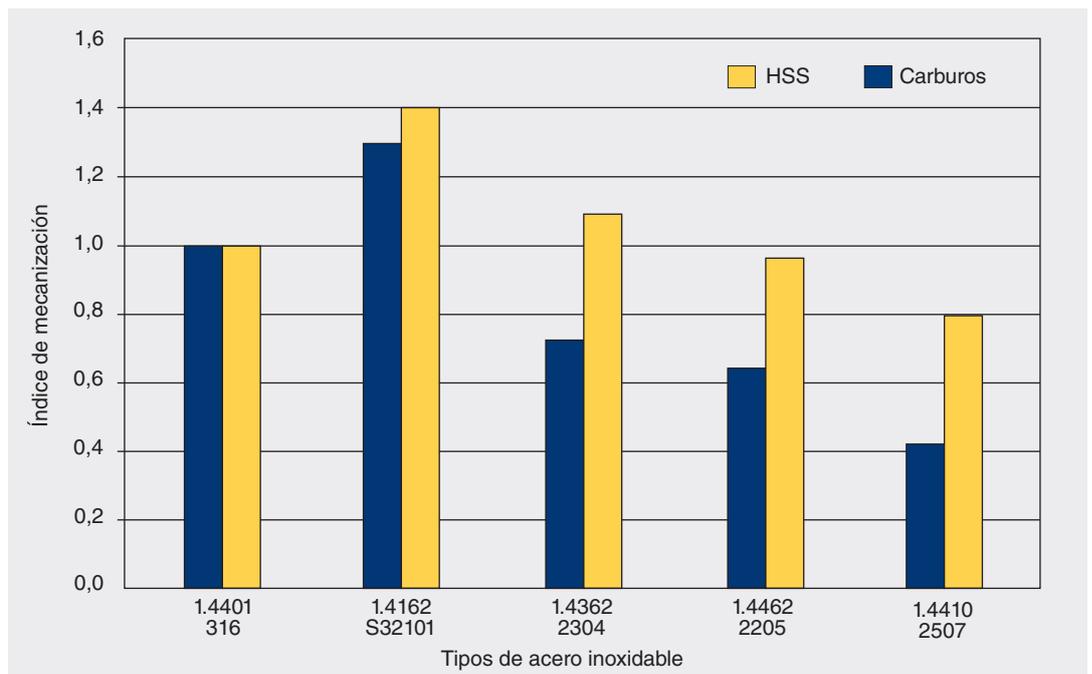


Figura 15. Mecanización relativa de aceros inoxidable dúplex en comparación con el Tipo 316 (2,5 Mo) para herramientas de carburo cementado y de acero de alta velocidad (Fuente: Outokumpu)

- Utilizar una velocidad adecuada, pero no excesiva, para evitar las virutas adheridas al filo de corte y el desgaste excesivo.
- Cambiar los insertos del utillaje o volver a afilarlos a intervalos programados para asegurar unos bordes de corte afilados.
- Aplicar caudales abundantes de refrigerante/lubricante utilizando aceites de corte o emulsiones con aditivos de extrema presión (EP).
- Utilizar insertos de carburo revestido con geometría de rompe virutas positiva.

## 11.2 Torneado y refrentado

Las operaciones de torneado y refrentado implican tantas variables que es imposible facilitar recomendaciones específicas aplicables a todas las condiciones. En la Figura 16 y en la Tabla 11 se indican las directrices generales para el torneado y el corte. En las operaciones de torneado pueden utilizarse herramientas de carburo, que permiten velocidades mayores que las de aceros de alta velocidad. Sin embargo, las herramientas de carburo requieren una mayor atención en relación con la rigidez, tanto del utillaje como de la pieza, debiéndose evitar la interrupción de los cortes.

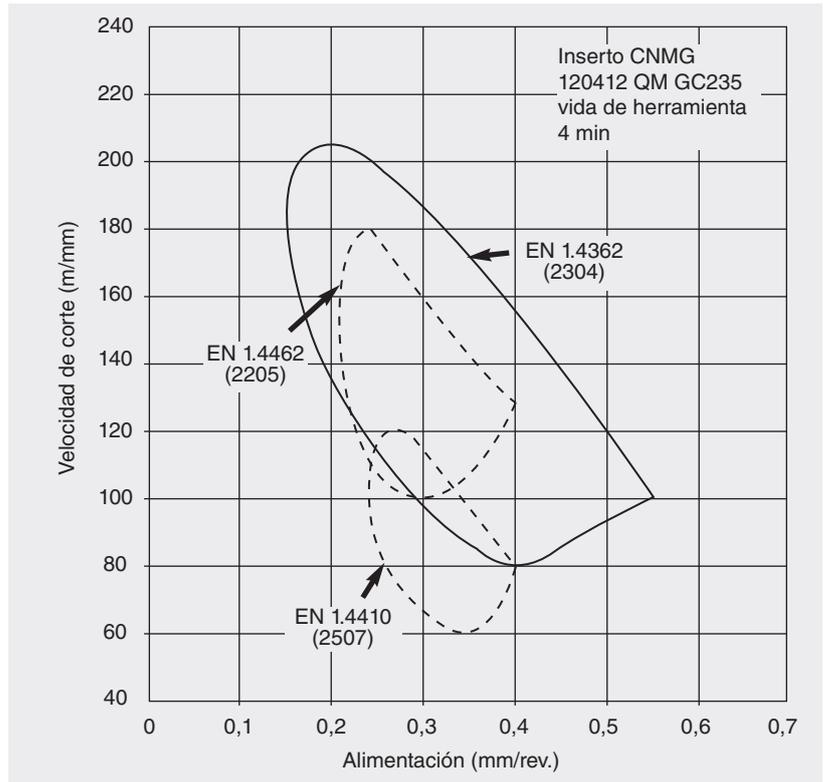


Figura 16: Comparación de parámetros de mecanizado para el torneado de aceros inoxidables dúplex con un inserto de carburo cementado con una vida de herramienta de cuatro minutos (Fuente: Sandvik)

Tabla 11: Directrices de mecanizado para el refrentado de aceros inoxidables dúplex (Fuente: Outokumpu)

Acero inoxidable (o datos de mecanizado)	Carburos				Herramientas de acero de alta velocidad	
	Desbastado		Acabado		Velocidad (m/min)	Velocidad (sfm)
	Velocidad (m/min)	Velocidad (sfm)	Velocidad (m/min)	Velocidad (sfm)		
S32101	170–240	560–790	200–280	660–925	20–30	65–100
2304	120–160	400–525	150–210	500–680	18–25	60–85
2205	90–120	300–400	120–160	400–525	15–20	50–65
Superdúplex	50–70	165–230	70–105	230–350	10–15	35–50
Alimentación (por vuelta)	0,3–0,6 mm	0,012–0,024 in.	0,05–0,3 mm	0,002–0,012 in.	0,05–0,2 mm	0,002–0,008 in.
Profundidad de corte	2–5 mm	0,080–0,200 in.	0,5–2 mm	0,020–0,080 in.	0,5–2 mm	0,020–0,080 in.
Tipo	2101, 2304, 2205: ISO P20–P35 (C5) Superdúplex: ISO P30–P50		2101, 2304, 2205: ISO P10–P15 (C6–C7) Superdúplex: ISO P25–P35		Alta calidad	



Operación de torneado (Fuente: Herramientas Seco)

### 11.3 Refrentado con carburos cementados

En la Tabla 12 se proporcionan directrices para el refrentado de aceros inoxidables dúplex con carburos cementados.

- Utilizar útiles revestidos o un tipo tenaz de útil para el desbastado. Puede utilizarse un útil más duro para el acabado para que sea más fino.
- Utilizar fresado concurrente con un espesor medio de viruta de al menos 0,1 mm (0,004 pulgadas). Ajustar la alimentación con un factor proporcional de 1,0 a 0,7 cuando el ángulo de entrada se aumente de 45° a 90°.
- No utilizar refrigerante, especialmente durante el desbastado, para una buena expulsión de las virutas de la herramienta.

Tabla 12: Directrices de mecanizado para el refrentado de aceros inoxidables dúplex con carburos cementados (Fuente: Outokumpu)

Acero inoxidable (o datos de mecanizado)	Desbastado		Acabado	
	Velocidad (m/min)	Velocidad (sfm)	Velocidad (m/min)	Velocidad (sfm)
EN 1.4162 (S32101)	180–230	595–760	200–250	660–825
1.4362 (2304)	100–130	330–425	130–150	425–525
1.4462 (2205)	50–80	165–260	80–110	260–360
1.4410 (2507)	30–50	100–165	50–70	165–230
Alimentación (por diente)	0,2–0,4 mm	0,008–0,016 in.	0,1–0,2 mm	0,004–0,008 in.
Profundidad de corte	2–5 mm	0,080–0,200 in.	1–2 mm	0,040–0,080 in.
Tipo del carburo	2101, 2304, 2205: ISO P20–P40 Superdúplex: ISO P25–P40		2101, 2304, 2205: ISO P10–P25 Superdúplex: ISO P20–P30	

**Tabla 13: Parámetros de taladrado helicoidal con acero de alta velocidad para aceros inoxidable dúplex en unidades SI (Fuente: Outokumpu)**

Diámetro de la broca (mm)	Velocidad (m/min)				Alimentación (mm/rev)			
	EN 1.4162 (UNS S32101)	EN 1.4362 (2304)	EN 1.4462 (2205)	Superdúplex	EN 1.4162 (UNS S32101)	EN 1.4362 (2304)	EN 1.4462 (2205)	Superdúplex
1-3	12-37	6-10	6-8	5-8		0,05		0,04
5	12-37	10-12	10-12	9-11		0,10		0,08
10	12-37	12-15	10-12	9-11		0,20		0,15
15	12-37	12-15	10-12	9-11		0,25		0,20
20	12-37	12-15	10-12	9-11		0,30		0,25
30	12-37	12-15	10-12	9-11		0,35		0,30
40	12-37	12-15	10-12	9-11		0,41		0,35

**Tabla 14: Parámetros de taladrado helicoidal con acero de alta velocidad para aceros inoxidable dúplex en unidades inglesas (Fuente: Outokumpu)**

Diámetro de la broca (in.)	Velocidad (sfm)				Alimentación (in./rev)			
	EN 1.4162 (UNS S32101)	EN 1.4362 (2304)	EN 1.4462 (2205)	Superdúplex	EN 1.4162 (UNS S32101)	EN 1.4362 (2304)	EN 1.4462 (2205)	Superdúplex
0,040-0,120	40-120	20-33	20-25	16-25		0,002		0,0015
0,2	40-120	33-40	33-40	30-36		0,004		0,003
0,4	40-120	40-50	33-40	30-36		0,008		0,006
0,6	40-120	40-50	33-40	30-36		0,01		0,008
0,8	40-120	40-50	33-40	30-36		0,012		0,01
1,2	40-120	40-50	33-40	30-36		0,014		0,012
1,6	40-120	40-50	33-40	30-36		0,016		0,014

## 11.4 Taladrado helicoidal con brocas de acero de alta velocidad

En las Tablas 13 y 14 se indican directrices para el taladrado helicoidal de aceros inoxidable dúplex con brocas HSS.

- Geometría de la broca: ángulo en la punta 130°; se recomienda geometría de puntas de broca con auto centrado y adelgazamiento del alma para brocas de gran diámetro.

- Refrigerante: emulsión al 10 % con caudal abundante en el punto de herramienta; para profundidades mayores de 2 veces el diámetro, retirar las virutas periódicamente inundando el agujero con refrigerante.
- Mayores velocidades: el revestimiento TiN permite un aumento del 10 %; el refrigerante permite un aumento del 10-20 %.

# 12 Soldadura de los Aceros Inoxidables Dúplex

## 12.1 Directrices generales de soldadura

### 12.1.1 Diferencias entre los aceros inoxidables austeníticos y los dúplex

Los problemas en la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos están, en la mayoría de los casos, relacionados con el propio metal de soldadura, especialmente la tendencia al agrietamiento en caliente en una solidificación total o predominantemente austenítica. Con los inoxidables austeníticos más comunes, estos problemas disminuyen ajustando la composición del metal de aporte para conseguir un contenido de ferrita significativo. Para los inoxidables austeníticos de mayor aleación, donde es necesario utilizar un metal de aporte de base níquel y la solidificación austenítica es inevitable, el problema se resuelve con un aporte térmico bajo, siendo necesarias en muchos casos un gran número de pasadas para completar la soldadura.

Puesto que los inoxidables dúplex tienen muy buena resistencia al agrietamiento en caliente debido al alto contenido de ferrita, este agrietamiento no suele tenerse en cuenta a la hora de soldar estos aceros. Los problemas más importantes con los inoxidables dúplex están relacionados con la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) y no con el metal de soldadura. Los problemas de la ZAT son pérdida de resistencia a la corrosión, tenacidad o agrietamiento posterior a la soldadura. Para evitar estos problemas, el procedimiento de soldadura se debe centrar en minimizar el tiempo total a temperatura en el rango del “rojo vivo”, más que en el aporte térmico de cada pasada. La experiencia ha demostrado que con este enfoque se pueden conseguir procedimientos óptimos desde un punto de vista técnico y económico.

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible proporcionar algunas directrices generales para la soldadura de los aceros inoxidables dúplex, aplicando posteriormente esta información y directrices a procesos de soldadura específicos.

### 12.1.2 Selección del material

La respuesta de los inoxidables dúplex a la soldadura puede modificarse sustancialmente por variaciones químicas o de procesado. La importancia de que el metal base contenga el nitrógeno suficiente ya se ha resaltado repetidamente. Si el material de partida se enfría lentamente entre 700 °C a 1000 °C (1300 °F a 1800 °F), o si se le deja enfriar al aire en este rango alrededor de un minuto antes del temple con agua, se habrá gastado parte del tiempo que dispone el soldador para completar la soldadura sin que se produzcan reacciones de precipitación perjudiciales. Es importante que la condición metalúrgica del material utilizado en la fabricación sea de la misma calidad, en relación con la composición y las prácticas de producción, que el material utilizado para la cualificación del procedimiento de soldadura. La selección de la composición y la especificación de ensayos apropiados para el material de partida se presentaron en la sección 6, especificación del usuario final y control de calidad.

### 12.1.3 Limpieza antes de la soldadura

La medida de limpiar antes de la soldadura todas las zonas que vayan a calentarse es aplicable tanto a los inoxidables dúplex, como a todos los aceros inoxidables. Las composiciones químicas del metal base y de aporte se han desarrollado suponiendo que no hay fuentes adicionales de contaminación. La suciedad, grasa, aceite, pintura y las fuentes de humedad de cualquier tipo interferirán con las operaciones de soldadura afectando adversamente a la resistencia a la corrosión y a las propiedades mecánicas de la construcción soldada. La cualificación de los procedimientos no es eficaz si no se limpia cuidadosamente el material antes de la soldadura.

### 12.1.4 Diseño de la unión

Para los inoxidables dúplex, el diseño de la unión debe facilitar la penetración completa y evitar que haya metal base no diluido en el metal de soldadura solidificado. Es mejor mecanizar que esmerilar la preparación de bordes para proporcionar uniformidad a la separación entre piezas. Cuando es necesario esmerilar, debe prestarse atención especial a la uniformidad



Reactor de designificación con oxígeno fabricado con EN 1.4462 (2205), Enterprise Steel Fab, Kalowna, Prince George, Columbia Británica, Canadá (Fuente: Outokumpu)

de la preparación para soldar y al ensamblado. Deben eliminarse todas las rebabas de esmerilado para mantener la fusión y penetración completas. Con un inoxidable austenítico, un soldador experto puede superar algunas deficiencias en la preparación de uniones manipulando el soplete. Con el inoxidable dúplex algunas de estas técnicas podrían causar exposiciones más prolongadas de las previstas en el

rango de temperaturas perjudiciales, con resultados distintos de los del procedimiento cualificado.

En la Figura 17 se muestran algunos diseños de unión utilizados con los aceros inoxidables dúplex. Otros diseños son posibles siempre que aseguren soldaduras de penetración completa y se minimice el riesgo de perforación.

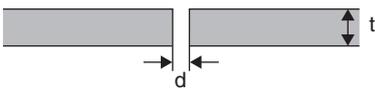
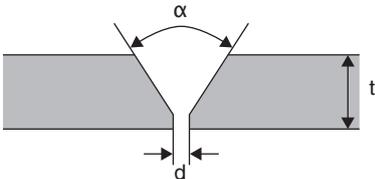
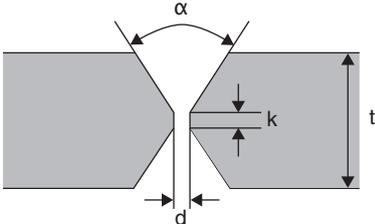
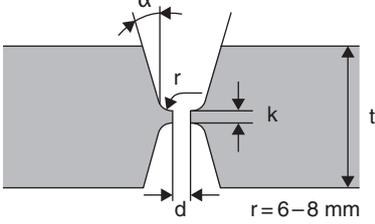
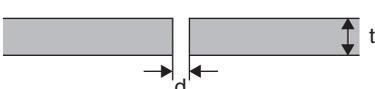
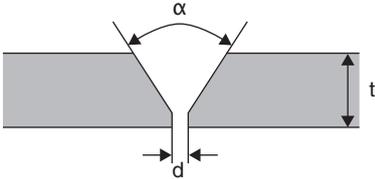
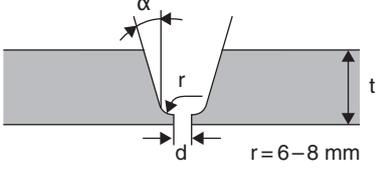
Diseño de junta	Proceso	Espesor t (mm)	Separación d (mm)	Raíz k (mm)	Bisel $\alpha$ (°)
	GTAW	3-5	1-3	-	-
	GMAW	3-6	1-3	-	-
	SMAW	3-4	1-3	-	-
	SMAW	4-15	1-3	1-2	55-65
	GTAW	3-8	1-3	1-2	60-70
	GMAW	5-12	1-3	1-2	60-70
	SAW	9-12	5	80	
	SMAW	>10	1,5-3	1-3	55-65
	GMAW	>10	1,5-3	1-3	60-70
	SAW	>10	0	3-5	90
	SMAW	>25	1-3	1-3	10-15
	GMAW	>25	1-3	1-3	10-15
	SAW	>25	0	3-5	10-15
	GTAW	>3	0-2	-	-
	GMAW	>3	0-2	-	-
	SMAW	>3	0-2	-	-
	SMAW	3-15	2-3	1-2	60-70
	GTAW	2,5-8	2-3	1-2	60-70
	GMAW	3-12	2-3	1-2	60-70
	SAW	4-12	2-3	1-2	70-80
	SMAW	12-60	1-2	2-3	10-15
	GTAW	>8	1-2	1-2	10-15
	GMAW	>12	1-2	2-3	10-15
	SAW	>10	1-2	1-3	10-15

Figura 17: Ejemplos de diseños de uniones utilizados con los aceros inoxidables dúplex (Fuente: Aperam)

### 12.1.5 Pre calentamiento

Como norma general, no se recomienda precalentar porque puede tener efectos perjudiciales. A menos que haya una justificación específica, no se debe considerar en un procedimiento. El precalentamiento puede ser beneficioso si se utiliza para eliminar la humedad del acero, como podría ocurrir a bajas temperaturas ambientales o por condensación nocturna. Cuando se precalienta para eliminar la humedad, el acero debe calentarse a unos 100 °C (200 °F) de forma uniforme y sólo después de que se hayan limpiado las piezas a soldar.

### 12.1.6 Aporte térmico y temperatura entre pasadas

Los aceros inoxidables dúplex pueden tolerar aportes térmicos relativamente altos. La estructura de solidificación dúplex del metal de soldadura resiste al agrietamiento en caliente, mucho más que la de los metales de soldadura austeníticos. Los inoxidables dúplex, con mayor conductividad térmica y menor coeficiente de dilatación térmica, no presentan la misma alta intensidad de tensiones térmicas locales en las soldaduras que los inoxidables austeníticos. Si bien es necesario limitar la severidad de la rigidez de la soldadura, la fisuración en caliente no es un problema habitual.

Un aporte térmico excesivamente bajo puede producir zonas de fusión y ZAT con exceso de ferrita y la correspondiente pérdida de tenacidad y de resistencia a la corrosión. El aporte térmico excesivamente alto aumenta el peligro de formación de fases intermetálicas. Para evitar problemas en la ZAT, el procedimiento de soldadura debería permitir el enfriamiento rápido de esta zona después del mismo. La temperatura de la pieza es importante porque afecta sensiblemente al enfriamiento de la ZAT. Como regla general, la temperatura máxima entre pasadas se limita a 150 °C (300 °F) para los inoxidables dúplex de baja aleación y convencionales y a 100 °C (210 °F) para los de baja aleación súper dúplex. Esta limitación debe imponerse en la cualificación del procedimiento de soldadura y se deberían controlar las soldaduras de producción para asegurar que la temperatura entre pasadas no supera la utilizada en la cualificación. Las sondas de temperatura electrónicas y los termopares son los instrumentos preferidos para el registro de la temperatura entre pasadas. No sería prudente en la cualificación del procedimiento de soldadura permitir que el cupón de prueba para una soldadura de pasadas múltiples alcanzara una temperatura entre pasadas menor que la que pudiera conseguirse, de manera razonable o por economía, durante la fabricación real.

Cuando vaya a soldarse de forma extensiva, se debe planificar que transcurra el tiempo suficiente para el enfriamiento entre pasadas desde el punto de vista de calidad y económico.

### 12.1.7 Tratamiento térmico posterior a la soldadura

El alivio de tensiones posterior a la soldadura no es necesario con los inoxidables dúplex y probablemente sea perjudicial, porque el tratamiento térmico puede precipitar fases intermetálicas o agrietamiento (475 °C/885 °F) alfa prima, con pérdida de tenacidad y de resistencia a la corrosión. La temperatura de tratamiento térmico posterior a la soldadura superior a 315 °C (600 °F) puede afectar negativamente la tenacidad y resistencia a la corrosión de los inoxidables dúplex.

Cualquier tratamiento térmico posterior a la soldadura debería incluir el recocido de solubilización completo seguido de un temple con agua (ver Tabla 10). El recocido de solubilización completo debería contemplarse después de la soldadura autógeno, ya que la microestructura será altamente ferrítica si no se utiliza un metal de aporte de alta aleación.

Si va a efectuarse un recocido de solubilización completo y un temple después de la soldadura, por ejemplo en la fabricación de un accesorio, este tratamiento térmico debe considerarse parte del procedimiento de soldadura. El tratamiento de recocido puede eliminar problemas asociados al exceso de ferrita y de fases intermetálicas, y el proceso de fabricación puede tolerar algunas de estas condiciones indeseables como un estado intermedio antes del recocido final.

### 12.1.8 Equilibrio de fases deseable

Se afirma con frecuencia que el equilibrio de fases de los inoxidables dúplex es del "50-50", cantidades iguales de austenita y de ferrita. Sin embargo, esto no es estrictamente cierto ya que los inoxidables dúplex modernos contienen un 40-50 % de ferrita, siendo el resto austenita. Se acepta generalmente que los beneficios característicos de los inoxidables dúplex se consiguen cuando contienen al menos un 25 % de ferrita y el resto de austenita. En algunos de los procesos de soldadura, especialmente los que utilizan fundente protector, el equilibrio de fases se ha ajustado con un aumento de austenita para mejorar la tenacidad, compensando la pérdida de esta propiedad asociada a la absorción de oxígeno del fundente. La tenacidad de estos metales de aporte se sitúa muy por debajo de los altos valores posibles

en chapas o tubos recocidos, pero la tenacidad del metal de soldadura puede seguir siendo adecuada para el servicio previsto. Ninguno de los procesos de soldadura producirá una tenacidad tan alta como la del producto forjado totalmente recocido. Requerir que el contenido de ferrita del metal de soldadura tenga un valor mayor que el mínimo requerido al inoxidable dúplex recocido, podría ser una limitación innecesaria sobre los procesos de soldadura aplicables.

Normalmente, el equilibrio de fases en la ZAT, partiendo de chapa o tubo forjado con un ciclo térmico adicional, es ligeramente más ferrítico que el material original. La determinación metalográfica precisa del equilibrio de fases en la ZAT es casi imposible. Si esta zona es altamente ferrítica, podría ser indicativo de un inusual temple extremadamente rápido que produjese exceso de ferrita y pérdida de tenacidad.



Estructura metalográfica de metal de soldadura dúplex EN 1.4462 (2205), 500x (Fuente: Lincoln Smitweld bv)

### 12.1.9 Soldadura de metales diferentes

Los inoxidables dúplex pueden soldarse a otros inoxidables dúplex, a inoxidables austeníticos y a aceros al carbono y de baja aleación.

Para soldar inoxidables dúplex a otros tipos dúplex se utilizan, en la mayoría de los casos, metales de aporte de inoxidable dúplex con mayor contenido de níquel que el metal base. El alto contenido de níquel del metal de aporte asegura la formación de un nivel de austenita adecuado en la soldadura durante el enfriamiento.

Cuando se sueldan a tipos austeníticos, normalmente se utilizan metales de aporte austeníticos de bajo carbono y un contenido de molibdeno intermedio entre el de los dos aceros; AWS E309L/ER309L se utiliza con frecuencia para este tipo de unión. El mismo metal de aporte, o AWS E309L/ER309L, se utiliza habitualmente para soldar inoxidables dúplex a aceros al carbono y de baja aleación. Si se utilizan metales de aporte de base níquel, deben estar exentos de niobio. Debido a que la resistencia de los inoxidables austeníticos es más baja que la de los tipos dúplex, las uniones soldadas efectuadas con metales de aporte austeníticos no serán tan fuertes como el metal de base dúplex.

En la Tabla 15 se resumen los metales de aporte que se utilizan con frecuencia para soldar aceros inoxidables dúplex a metales diferentes. Estos ejemplos utilizan la designación de electrodo (E) de AWS, pero dependiendo del proceso, geometría de la unión y otras consideraciones, podría considerarse el uso de alambres desnudos (designación ER de AWS) y de alambres tubulares.

Tabla 15: Consumibles de soldadura utilizados para la soldadura de metales disimilares

	1.4362 (2304) 1.4162 (S32101) 1.4062 (S32202) S82011	1.4462 (2205) S32003	25 % Cr duplex Superduplex
1.4362 (2304) 1.4162 (S32101) 1.4062 (S32202) S82011	23Cr-7Ni-N E2209 E309L	E2209	E2209
1.4462 (2205) S32003	E2209	E2209	25Cr-10Ni-4Mo-N
Dúplex 25 % Cr Superdúplex	E2209	25Cr-10Ni-4Mo-N	25Cr-10Ni-4Mo-N
1.4301 (304)	E2209 E309L E309LMO	E2209 E309LMO	E2209 E309LMO
1.4401 (316)	E2209 E309LMO	E2209 E309LMO	E2209 E309LMO
Acero al carbono Acero de baja aleación	E2209 E309L E309LMO	E2209 E309L E309LMO	E2209 E309L E309LMO

## 12.2 Cualificación del procedimiento de soldadura

Con los aceros inoxidable austeníticos convencionales, los ensayos de cualificación habituales para los procedimientos de soldadura son bastante simples, solo se necesitan algunos ensayos, el material a soldar, el metal de aporte y el proceso de soldadura. Con los ensayos de dureza y los de doblado (para evaluar la martensita y el agrietamiento en caliente respectivamente), estos ensayos de cualificación tienen gran experiencia con los problemas de los aceros ferríticos, martensíticos o austeníticos. Es poco probable que los inoxidable dúplex tengan dificultades con estos requisitos, pero también es improbable que estos ensayos detecten fases intermetálicas o exceso de ferrita, dos problemas posibles con los inoxidable dúplex. Además, por la necesidad de limitar el tiempo total a temperatura en la ZAT, las propiedades de los tipos dúplex dependen del espesor y de los detalles de la práctica real de soldadura. Por lo tanto, la “cualificación” debe considerarse en un sentido más amplio, es decir, como demostración de que los procedimientos de soldadura que se aplicarán durante la fabricación no producirán una pérdida inaceptable de propiedades, especialmente tenacidad y resistencia a la corrosión.

Sería prudente cualificar el procedimiento de soldadura para cada espesor y geometría de la soldadura, porque pequeñas diferencias en la configuración pueden afectar a los resultados obtenidos en producción. Sin embargo, la compleja naturaleza de las construcciones actuales hace que estos ensayos sean muy costosos. Pueden obtenerse ahorros cualificando los procedimientos (definidos por el espesor, metal de

aporte y proceso de soldadura) en las condiciones más rigurosas para los aceros inoxidable dúplex.

## 12.3 Procesos de soldadura

Los aceros inoxidable dúplex de segunda generación experimentaron un importante desarrollo comercial a comienzos de los años 80 del siglo XX. Con conocimiento limitado del papel del nitrógeno en el control de la estabilidad de fases, la preocupación inicial del soldadura se centró en la limitación del aporte de calor. Tal limitación provocó que muchos de los procesos de soldadura más rentables con altas velocidades de deposición, como el arco sumergido, se consideraran inapropiados para los inoxidable dúplex. Sin embargo, las propiedades de los inoxidable dúplex son tan deseables que se hizo un gran esfuerzo para poder utilizar los procesos más rentables. El resultado es que actualmente la práctica totalidad de los procesos de soldadura, excepto el oxiacetilénico por la contaminación con carbono de la soldadura, son aplicables a los inoxidable dúplex.

### 12.3.1 Soldadura por arco con gas inerte y electrodo de wolframio (GTAW/TIG)

La soldadura por arco con gas inerte y electrodo de wolframio (GTAW), también conocido como soldadura TIG, es especialmente útil para cordones cortos de soldaduras manuales. Puede automatizarse para geometrías simples, pero en general no es rentable como principal procedimiento en equipos de grandes dimensiones con muchas soldaduras. Puesto que muchos productos necesitarán algunas soldaduras TIG, incluso si es otro procedimiento el proceso de soldadura principal, normalmente resulta adecuado cualificar procedimientos TIG para reparaciones o acabados locales.

#### Equipo

La mejor manera de realizar soldaduras TIG es con una fuente de energía de corriente constante, con circuito de alta frecuencia para facilitar el cebado del arco. La soldadura TIG debe efectuarse con corriente continua polaridad directa (CCPD), electrodo negativo. El uso de corriente continua polaridad inversa (CCPI) provocará el deterioro del electrodo.

El electrodo debería ser de wolframio toriado al 2 % (especificación AWS 5.12 Clasificación EWT-2). Para facilitar el control del arco, la punta del electrodo se rectifica de forma cónica con ángulo de 30 a 60 grados y una pequeña parte plana en el extremo. El ángulo del vértice ideal para conseguir penetración en el TIG automático debería determinarse mediante ensayos en la producción real.

#### Metales de aporte

La mayoría de los metales de aporte para la soldadura de los inoxidable dúplex se describen como “coincidentes”, aunque normalmente están sobrealoadados con níquel en comparación con los productos transformados con los que supuestamente debían



Equipos de recuperación de petróleo optimizados en acero inoxidable EN 1.4410 (2507)  
(Fuente: Aquatech)



**Soldadura mecanizada de una tubería de acero inoxidable dúplex de gran diámetro (Fuente: Arco Exploration and Production Technology)**

coincidir. El contenido de níquel suele ser del 2 % al 4 % más alto que en el del producto transformado. El contenido de nitrógeno normalmente es ligeramente inferior al del metal base. Generalmente se acepta que los aportes de inoxidable dúplex de alta aleación son adecuados para soldar los productos de inoxidables dúplex menos aleados. Los aportes “coincidentes” ofrecen resultados aceptables cuando se unen inoxidables dúplex a inoxidables austeníticos o a aceros al carbono y aleados.

### Protección

En la soldadura TIG, igual que en todos los procesos de soldadura con protección gaseosa, es esencial que el baño de soldadura esté protegido de la contaminación y oxidación atmosférica. En la mayoría de los casos la protección se consigue con argón como gas inerte, tipo de soldadura seco con pureza superior al 99,95 %. Es importante que el sistema de manipulación del gas esté limpio, seco y libre de fugas, así como que el caudal se ajuste para facilitar la cobertura adecuada y evitar la turbulencia y aspiración de aire al gas de protección. El caudal de gas debe iniciarse varios segundos antes del cebado del arco y mantenerse durante varios segundos después de su extinción, el tiempo que sea necesario para que tanto la soldadura como la ZAT se enfríen por debajo del rango de oxidación del acero inoxidable. Para proteger al electrodo, los caudales recomendados son 12–18 l/min (0,4–0,6 cfm) cuando se utiliza una pantalla difusora de gas normal (lente de gas), y con la mitad de este caudal con una tobera de gas normal.

Los caudales de gas de respaldo (también argón puro) dependen del volumen de la raíz, debiendo ser

suficientes para asegurar la expulsión completa del aire y la total protección de la soldadura, sin producirse coloración térmica. Puesto que el argón es más pesado que el aire, la alimentación debe efectuarse desde la parte inferior a la superior del volumen cerrado, con una purga mínima de siete veces el volumen.

Se han obtenido soldaduras satisfactorias con argón puro pero son posibles mejoras adicionales. La adición de hasta un 3 % de nitrógeno seco favorecerá la retención de nitrógeno en el metal de soldadura, especialmente en el caso de los inoxidables dúplex altamente aleados. A pesar de que la adición de nitrógeno incrementa el desgaste del electrodo, la adición de helio compensa parcialmente este efecto.

Deben evitarse las adiciones de oxígeno y de dióxido de carbono al gas de protección ya que reducen la resistencia a la corrosión de la soldadura. No debe utilizarse hidrógeno en el gas de protección, o de respaldo, por la posibilidad de fragilidad o agrietamiento por hidrógeno de la fase ferrita en los inoxidables dúplex.

El sistema de manipulación del gas y el de refrigeración con agua, si el soplete lo necesitase, deben inspeccionarse periódicamente para asegurar que se mantiene la naturaleza seca y limpia del gas.

### Técnica y parámetros

Con los inoxidables dúplex es especialmente importante establecer una buena y consistente preparación de bordes, alineación y separación en la raíz. Mientras que con los inoxidables austeníticos es posible, en cierta medida, utilizar técnicas de soldadura para superar deficiencias en estas áreas, con los inoxidables dúplex además existe el riesgo del tiempo de exposición a temperatura cuando se utilizan tales técnicas. Se recomienda evitar en lo posible las pletinas de respaldo de cobre, porque los inoxidables dúplex son sensibles a la contaminación superficial por cobre.

Todos los cebados de arco fuera de la zona de soldadura crearán puntos locales de soldadura autógeno con altas velocidades de temple, que provocarán altos contenidos locales de ferrita y posible pérdida de resistencia a la corrosión en estos puntos. Para evitar este problema los cebados de arco deben efectuarse en la propia unión a soldar.

Los puntos de soldadura deben efectuarse con protección de gas completa. No debe haber puntos de soldadura en el inicio de la pasada de raíz. Lo ideal, para evitar el agrietamiento del cordón de raíz por los puntos de soldadura, sería interrumpir la soldadura y eliminar por esmerilado el punto de soldadura, o esmerilar parcialmente el punto de soldadura antes de la pasada de raíz. La separación en la raíz debe mantenerse cuidadosamente para asegurar un aporte térmico y dilución consistentes en el cordón. El inicio y fin de la pasada de raíz deberían esmerilarse antes de depositar las pasadas de relleno. La pieza debería dejarse enfriar entre pasadas por debajo de 150 °C



**Camión cisterna para el transporte de asfalto de acero inoxidable de baja aleación dúplex (Fuente: Outokumpu)**

(300 °F) para los inoxidables dúplex convencionales y por debajo de 100 °C (210 °F) para los inoxidables súper dúplex, con el fin de permitir el enfriamiento adecuado de la ZAT en las subsiguientes pasadas.

En la soldadura TIG el metal de aporte más utilizado para unir inoxidables dúplex es el de aporte “coincidente”, ligeramente sobre aleado con níquel. Los metales de aporte coincidentes también se han utilizado con éxito para soldar inoxidable dúplex de alta aleación, como el superdúplex EN 1.4462 (2205). Las dimensiones de alambre de 1,6, 2,4 y 3,2 mm (1/16, 3/32 y 1/8 de pulgada) de diámetro son las más utilizadas. El alambre de aporte debe estar limpio y seco, debiéndose almacenar en un recipiente cerrado hasta su uso. Los mejores resultados se obtienen cuando la soldadura se efectúa en posición horizontal. El soplete debe mantenerse lo más cerca posible de la vertical para minimizar la aspiración de aire al gas de protección.

Hay gran libertad para la selección del aporte térmico en un amplio rango de espesores y de diseños de uniones. Normalmente el aporte térmico está entre 0,5–2,5 kJ/mm (15 a 65 kJ/pulgada) calculado con la siguiente fórmula:

$$\text{Aporte térmico (kJ/mm)} = (V \times A) / (S \times 1000)$$

donde V = tensión (voltios)  
A = intensidad (amperios)  
S = velocidad (mm/s)

o

$$\text{Aporte térmico (kJ/pulgada)} = (V \times A \times 6) / (S \times 100)$$

donde V = tensión (voltios)  
A = intensidad (amperios)  
S = velocidad (pulgadas/min)

Recomendaciones generales para el aporte térmico:  
EN 1.4362 (2304)\* 0,5–2,0 kJ/mm (15–50 kJ/pulgada)  
EN 1.4462 (2205) 0,5–2,5 kJ/mm (15–65 kJ/pulgada)  
EN 1.4410 (2507) 0,3–1,5 kJ/mm (8–38 kJ/pulgada)  
(\* ) o de baja aleación dúplex

La soldadura TIG, cuando se realiza con buena protección y control apropiado de temperatura y tiempo proporciona soldaduras de buena tenacidad y resistencia a la corrosión, siendo versátil en las situaciones en las que puede utilizarse. Este soldadura se utiliza con frecuencia para suplementar y acabar construcciones de gran tamaño ensambladas mediante otros procesos de soldadura. Es importante cualificar los procedimientos TIG contemplando las diversas situaciones en las que se puede utilizar.

### **12.3.2 Soldadura por arco con gas inerte y electrodo consumible (GMAW/MIG)**

La soldadura por arco con gas (GMAW), denominado soldadura MIG cuando el gas es inerte, es especialmente útil para cordones de soldadura largos de bajo coste cuando se depositan grandes cantidades de metal de soldadura. Puede automatizarse para geometrías simples. La soldadura GMAW se utiliza con frecuencia para cordones de soldadura largos, suplementándose con la soldadura GTAW para un mejor control de las operaciones de acabado complejas.

#### **Equipo**

La soldadura GMAW requiere equipos especializados incluyendo una fuente de tensión constante con control de pendiente y de inductancia variables, o con corriente de arco pulsada. La soldadura GMAW debería efectuarse con corriente continua de polaridad inversa (CCPI), electrodo positivo, y hay tres modos posibles de transferencia de arco.

#### **Transferencia cortocircuito**

Este modo, que requiere controles de pendiente y de inductancia secundaria independientes, es útil para materiales de hasta 3 mm (1/8 de pulgada) de espesor. Este modo es el de aporte térmico más bajo, siendo especialmente útil para secciones delgadas cuando existe riesgo de deformación con aportes térmicos altos. Puede utilizarse para la soldadura en posición.

**Transferencia por arco pulsado**

Este modo requiere dos fuentes de alimentación para proporcionar los dos rangos de salida, siendo la conmutación de las fuentes la que proporciona el pulso. La transferencia de metal es alta durante el rango de transferencia por rociado (spray) y más baja durante el rango globular. Esta combinación ofrece la ventaja de altas velocidades de deposición de metal, sin dejar de limitar al aporte térmico.

**Transferencia por rociado**

Este modo proporciona altas velocidades de deposición con arco estable, pero el aporte térmico es alto. Normalmente su uso se limita a la soldadura en posición horizontal. Resulta económica cuando se efectúan cordones de soldadura largos y rectos con aportaciones moderadamente grandes.

**Metales de aporte**

El método GMAW utiliza un electrodo consumible en forma de alambre continuo que se alimenta a través de la pistola mediante un sistema automático. Los metales de aporte para la soldadura de los inoxidables dúplex son composiciones “coincidentes” sobre aleadas con níquel para conseguir el equilibrio de fases y las propiedades deseadas en estado bruto de soldadura.

**Protección**

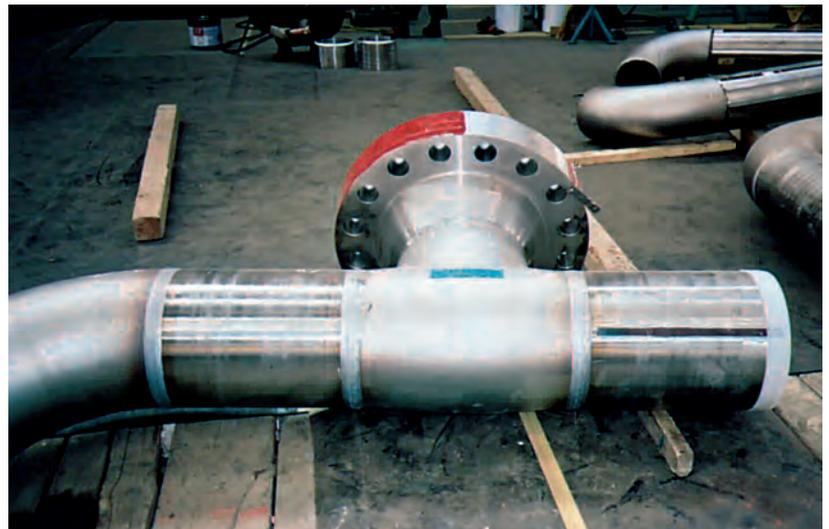
La selección del gas de protección para GMAW es algo más compleja que en GTAW y depende, en gran medida, de si el fabricante utiliza mezclas de gases comerciales o de si puede mezclar gases en sus instalaciones. El rango de los gases de protección en GMAW oscila entre argón puro y mezclas de argón, alrededor del 80 %, con helio, nitrógeno y oxígeno seleccionadas para optimizar la soldabilidad y las propiedades finales de la estructura soldada. Los caudales dependen del modo de transferencia, velocidad de trabajo y diámetro del alambre, pero normalmente se sitúan en el rango de 12–16 l/min (0,4 a 0,6 cfm) para diámetros de alambre de 1 mm a 1,6 mm (0,035 a 0,063 pulgadas). Se debería evitar la prolongación de alambre excesiva para asegurar la protección durante la soldadura. Como en GTAW, la integridad del sistema de manipulación de gas es crítica debiéndose adoptar precauciones para evitar la aspiración de aire al gas de protección. Como la soldadura se efectúa con cordones más largos, la protección contra las corrientes de aire es importante para mantener la calidad de las soldaduras. No debe utilizarse hidrógeno en el gas de protección o en el de respaldo debido a la posibilidad de fragilización o agrietamiento por hidrógeno de la fase ferrita en los inoxidables dúplex.

**Técnica y parámetros**

Los parámetros de soldadura típicos para la transferencia globular y por rociado se resumen en la **Tabla 16**.

Como con la soldadura GTAW de inoxidables dúplex, el proceso GMAW requiere una buena y consistente preparación de bordes, alineación y separación en la raíz. Se deben evitar en lo posible las pletinas de respaldo de cobre debido a que los inoxidables dúplex son sensibles a la contaminación superficial por cobre y, en algunas situaciones, pueden provocar un temple demasiado rápido.

Todos los cebados de arco fuera de la zona de soldadura crearán puntos locales de soldadura autógeno con altas velocidades de temple, provocando un contenido local de ferrita alto y una posible pérdida de resistencia a la corrosión en estos puntos. Para evitar este problema los cebados de arco deberían efectuarse en la propia unión a soldar. Todos los cebados de arco fuera de la zona de soldadura deberían eliminarse mediante esmerilado fino.



**Pieza en T embreadada de EN 1.4462 (2205) (Fuente: Arco Exploration and Production Technology)**

**Tabla 16: Parámetros típicos de soldadura por arco con gas (GMAW) con transferencia globular y por rociado para aceros inoxidables dúplex con varias dimensiones de alambre (Fuente: Avesta Welding)**

Transferencia cortocircuito			
Diámetro del alambre		Corriente	Voltaje
mm	inch	A	V
1,0	0,035	90–120	19–21
1,2	0,045	110–140	20–22
Transferencia por rociado			
1,0	0,035	170–200	25–28
1,2	0,045	210–280	26–29
1,6	0,063	270–330	27–30



**Soldadura mecanizado de una conducción de acero inoxidable dúplex de gran diámetro en la pendiente norte de Alaska (Fuente: Arco Exploration and Production Technology)**

Los puntos de soldadura de posicionamiento deben efectuarse con protección de gas completa. No debe haber puntos de soldadura en el inicio de la pasada de raíz. Lo ideal, para evitar el agrietamiento del cordón de raíz por los puntos de soldadura, sería interrumpir la soldadura y eliminar por esmerilado el punto de soldadura, o esmerilar parcialmente el punto de soldadura antes de la pasada de raíz. La separación en la raíz debe mantenerse cuidadosamente para asegurar en el cordón de raíz un aporte térmico y dilución consistentes. El inicio y fin del cordón de raíz deberían esmerilarse antes del inicio de las pasadas de relleno. La pieza debería dejarse enfriar entre pasadas de soldadura por debajo de 150 °C (300 °F) para permitir el enfriamiento adecuado de la ZAT en las subsiguientes pasadas.

Los tamaños de alambre de 1,6 mm; 2,4 mm y 3,2 mm (1/16, 3/32 y 1/8 de pulgada) son los más utilizados. El alambre de aporte debe estar limpio y seco, debiéndose almacenar en un recipiente cerrado hasta su uso. El tubo guía debería mantenerse limpio y seco. Los mejores resultados se obtienen cuando se suelda en posición horizontal. La pistola debe mantenerse lo más cerca posible de la vertical para minimizar la aspiración de aire al gas de protección.

### **12.3.3 Soldadura por arco con alambre tubular (FCW)**

La soldadura por arco con alambre tubular es uno de los desarrollos comerciales más recientes para los aceros inoxidables dúplex. Su éxito demuestra el alcance y la rapidez con que se desarrolla la tecnología de los inoxidables dúplex. En FCW, el alambre relleno de fundente se alimenta automáticamente a

través de la pistola, utilizando los mismos equipos que se utilizan en GMAW. El polvo del interior del alambre proporciona algunos de los elementos de aleación del metal de soldadura y la escoria protege la soldadura de la atmósfera colaborando con el gas de protección en la protección de la ZAT. La soldadura FCW es rentable porque proporciona altas velocidades de deposición siendo adecuado para la soldadura en todas las posiciones y con una amplia gama de espesores.

#### **Equipo**

La soldadura por arco con alambre tubular se efectúa utilizando los mismos equipos que con GMAW.

#### **Metales de Aporte**

Como los procesos de soldadura de protección con fundente tienden a producir soldaduras con tenacidad algo menor, probablemente como resultado del incremento del contenido de oxígeno en el metal de soldadura, el metal de aporte para FCW se sobre alea con níquel de manera que el metal de soldadura es más austenítico que la estructura prácticamente equilibrada del metal de base. Puesto que tanto la composición de los fundentes como la fabricación del alambre están patentadas, puede haber diferencias significativas entre los aportes para FCW de diferentes proveedores. Es importante que la soldadura de producción por FCW utilice alambre procedente de la misma fuente que se utilizó en la cualificación de procedimientos para evitar diferencias.

#### **Protección**

Los gases de protección más utilizados en FCW son 80 % argón-20 % dióxido de carbono y 100 % dióxido de carbono para la soldadura horizontal y vertical, respectivamente. El caudal para cada gas o posición es de 20–25 l/min (0,7–0,9 cfm). El control de la prolongación del alambre es importante para la limitar la absorción de carbono, especialmente si se utiliza 100 % de dióxido de carbono.

#### **Técnica y Parámetros**

Para el alambre de diámetro 1,2 mm (0,045 pulgada), los ajustes de corriente y de voltaje típicos son 150–200 A a 22–38 V y 60–110 A a 20–24 V, para la soldadura horizontal y vertical respectivamente. El resto de las recomendaciones sobre técnica de soldadura para FCW son idénticas a las de GMAW.

### **12.3.4 Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)**

La soldadura por arco con electrodo revestido, es un proceso de soldadura muy versátil para geometrías complejas en situaciones donde las posiciones o las posibilidades de protección son relativamente difíciles. Si bien es posible utilizar el SMAW en todas las soldaduras de una estructura, especialmente en el caso de estructuras pequeñas y complejas, SMAW se utiliza con frecuencia en grandes estructuras en combinación con procesos de soldadura más eficientes.

## Equipo

El equipo necesario para SMAW es una fuente de alimentación de corriente constante. La soldadura SMAW se efectúa con corriente continua polaridad inversa (CCPI), electrodo positivo.

## Metales de aporte

El electrodo consiste en un núcleo metálico consumible revestido de fundente. El revestimiento puede contener o no elementos de aleación adicionales que se incorporen a la soldadura. El revestimiento es una compleja mezcla patentada que proporciona estabilidad al arco, protección del metal durante su transferencia y protección de la soldadura de la atmósfera durante y después de la solidificación. Debido a que los revestimientos están patentados, puede haber diferencias significativas entre productos nominalmente similares de diferentes proveedores. Los revestimientos pueden realzar la mejora de la tenacidad de la soldadura o el aspecto físico y pueden diseñarse especialmente para un mejor comportamiento en una posición específica, tal como horizontal, en posición o vertical.

Los revestimientos de los electrodos SMAW son higroscópicos y la presencia de agua degradará sustancialmente su rendimiento. Los electrodos deben mantenerse en su envase de fábrica sin abrir hasta su uso. Una vez abierto el envase, deberían almacenarse en un horno a 95 °C (200 °F) o más para evitar la acumulación de humedad que pueda provocar porosidad o agrietamiento de la soldadura. Como el fundente aumenta el contenido de oxígeno de la soldadura reduciendo, por lo tanto, la tenacidad, es habitual equilibrar los electrodos para SMAW cerca del nivel máximo de austenita en el que el metal seguirá teniendo los efectos beneficiosos de la estructura dúplex. La tenacidad de la soldadura se sitúa muy por debajo de la del metal de base, pero normalmente muy por encima de los niveles de tenacidad considerados adecuados para los aceros al carbono y aleados. Un error que se ha cometido a veces en la cualificación de las soldaduras SMAW, es utilizar el ensayo ASTM A 923 sin el ajuste apropiado del criterio de aceptación. La menor tenacidad de las soldaduras SMAW no es indicativa de fases intermetálicas, sino que se atribuye al oxígeno del fundente de protección. Requerir un mínimo de 54 J/40 ft-lb a 40 °C/°F igual que al metal de base, tiene como resultado la no apropiada cualificación de este versátil procedimiento que se ha utilizado durante años con resultados prácticos excelentes. De acuerdo con ASTM A 923, la energía de impacto mínima para el metal de soldadura es de 34 J/25 ft-lb y de 54 J/40 ft-lb para la zona afectada térmicamente.

## Protección

La protección no es un aspecto a tener en cuenta con este proceso de soldadura debido a que se basa en el fundente y gases de protección generados por el revestimiento de los electrodos.

## Técnica y parámetros

Los parámetros de soldadura SMAW son en gran medida función del diámetro del electrodo, como se muestra en la **Tabla 17**.

Para maximizar la protección proporcionada por el fundente, el soldador debe mantener el arco lo más corto posible. Una separación demasiado grande, denominada “arco largo”, puede producir porosidad de la soldadura, oxidación y aportes térmicos excesivos, así como reducción de las propiedades mecánicas.

El cordón de raíz debería efectuarse con electrodos de menor dimensión, utilizándose los de dimensión mayor para las pasadas de relleno. El cebado del arco siempre debe realizarse en la propia zona de soldadura. Cualquier otro cebado de arco, o las salpicaduras, deberían eliminarse mediante esmerilado fino.

La soldadura SMAW no debe utilizarse en inoxidables dúplex de menos de 2 mm (0,08 pulgadas) de espesor. La pieza debe situarse horizontal, si fuese posible, aunque pueden seleccionarse electrodos que permiten soldar en todas las posiciones. El electrodo debe mantenerse con un ángulo de 20° (el ángulo de arrastre) respecto a la pieza, con el portaelectrodo inclinado hacia la dirección de trabajo. El metal debe depositarse con cordones rectos y mínima oscilación. La corriente debería ajustarse lo suficientemente alta para proporcionar un arco suave y buena fusión de la soldadura y del metal de base.

**Tabla 17: Parámetros típicos de la soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) para aceros inoxidables dúplex con electrodos de varias dimensiones (Fuente: Outokumpu)**

Diámetro del electrodo			
Diámetro de la varilla		Intensidad	Voltaje
mm	inch	A	V
2,0	0,078	35–60	22–28
2,5	0,094	60–80	22–28
3,25	0,125	80–120	22–28
4,0	0,156	100–160	22–28



**Colector de EN 1.4462 (2205) (Fuente: Arco Exploration and Production Technology)**

### 12.3.5 Soldadura por arco sumergido (SAW)

La soldadura por arco sumergido permite la deposición de soldaduras relativamente grandes con menos tiempo total a temperatura para la ZAT de lo que sería posible con un gran número de pasadas de menor deposición. Debido a la solidificación ferrítica y a la transformación dúplex del metal de soldadura, los inoxidables dúplex pueden soldarse por arco sumergido con un riesgo mínimo de agrietamiento en caliente. Sin embargo, para obtener soldaduras con penetración completa es necesario hacer algunos ajustes en el diseño de las uniones, o en los parámetros de soldadura, en relación con los inoxidables austeníticos. Las soldaduras SAW efectuadas a una velocidad muy elevada, combinadas con diseños de junta desfavorables, pueden provocar fisuras en su eje, aunque normalmente la reducción de la velocidad permite subsanar este problema. Para grandes construcciones y para grandes cordones rectos, el proceso SAW es rentable y técnicamente satisfactorio para la soldadura de los inoxidables dúplex. La soldadura SAW se utiliza habitualmente para la fabricación de tubos de inoxidable dúplex de altos espesores.

#### Metales de aporte y protección

Para la soldadura SAW el metal de aporte dúplex coincidente resulta apropiado. Es importante, sin embargo, seleccionar un fundente correcto para obtener las propiedades deseadas. Se sabe que los fundentes muy básicos proporcionan la mejor resistencia al impacto con los inoxidables dúplex.

#### Técnica y parámetros

Los parámetros típicos para SAW de aceros inoxidables dúplex se resumen en la Tabla 18.

**Tabla 18: Parámetros típicos de la soldadura por arco sumergido (SAW) para los aceros inoxidables dúplex con electrodos de varias dimensiones (Fuente: Outokumpu)**

Diámetro de la varilla		Intensidad	Voltaje
mm	inch	A	V
2,5	0,094	250–450	28–32
3,25	0,125	300–500	29–34
4,0	0,156	400–600	30–35
5,0	0,203	500–700	30–35

Nota: Normalmente la velocidad de trabajo es 30–60 cm/minuto

### 12.3.6 Soldadura por haz de electrones y por láser

La experiencia con estos procesos de soldadura en su aplicación a los inoxidables dúplex ha sido positiva. Estos procedimientos generan zonas afectadas térmicamente muy limitadas y enfriamientos rápidos que impiden la formación de fases intermetálicas. Sin embargo, la alta velocidad de enfriamiento asociada a estos procesos puede provocar la formación de un exceso de ferrita en la soldadura, por lo que la cualificación del procedimiento de soldadura puede ser un aspecto crítico. Con estos procesos el recocido de solubilización después de la soldadura reduce el nivel de ferrita y mejora la proporción de las fases austenita/ferrita de la soldadura.

### 12.3.7 Soldadura por resistencia

Cuando se utiliza la soldadura por resistencia con impulso simple en la soldadura por puntos, la ZAT se temple rápidamente. Este temple es todavía más rápido en los inoxidables dúplex que en los inoxidables austeníticos por la mayor conductividad térmica del acero dúplex. En esta situación, habrá una capa fina de material inmediatamente adyacente a la línea de fusión que alcanza el rango de temperatura donde la estructura dúplex se convierte totalmente en ferrita. El enfriamiento es tan rápido que es improbable que incluso los inoxidables dúplex con mayor contenido de nitrógeno formen de nuevo austenita en esta región. Esto permite tener un material de base tenaz y una soldadura con una capa de ferrita continua interpuesta de tenacidad limitada.

Con un equipo de soldadura por resistencia programable, sería posible desarrollar un ciclo de soldadura de dos impulsos que redujese la velocidad de enfriamiento lo suficiente para evitar esta capa de ferrita continua. También podría ser necesario cualificar secciones de espesores diferentes.

Es menos probable que un equipo de soldadura por roldana tenga este mismo problema, y muy poco probable que se den tiempos de exposición suficientemente largos que permitan la formación de fases intermetálicas, pero la cualificación de la soldadura debe considerar de manera especial el posible exceso de ferrita.

## 13 Otras Técnicas de Unión

Las ventajas de otras técnicas de unión distintas de la soldadura (donde el material base se funde para producir una unión) incluyen un alabeo mínimo y bajas tensiones residuales. Las uniones pueden ser estancas y bastante resistentes. Sin embargo, el enlazamiento nunca es tan íntimo en sus propiedades al de una soldadura, en la que la resistencia a la corrosión y las características mecánicas son casi tan altas, o superiores, a las del material base. Este es un aspecto importante a considerar con los inoxidables dúplex, superiores a los inoxidables austeníticos de la serie 300 tanto en características mecánicas como en resistencia a la corrosión.

### 13.1 Preparación de la unión

En todas las operaciones de unión, es muy importante limpiar de forma exhaustiva el acero inoxidable antes de unir las piezas. Las superficies deben estar libres de aceite, grasa, suciedad, polvo o huellas dactilares. Debe utilizarse un disolvente para retirar estos contaminantes superficiales. El aceite o la grasa pueden impedir que el fundente elimine la capa de óxido en la soldadura fuerte y blando. Los contaminantes superficiales sueltos reducen el área de la superficie a unir. En muchos casos, una superficie ligeramente rugosa proporciona mejores uniones que una superficie lisa. A veces desbastar con un abrasivo fino puede contribuir a aumentar la humectabilidad de una superficie, que es crítica para un buen enlazamiento.

### 13.2 Adhesivos

Existe una gran diversidad de adhesivos comerciales para la unión de superficies metálicas. Para la unión con adhesivos, los inoxidables dúplex se tratan de la misma manera que cualquier otro metal. Los fabricantes de adhesivos pueden ayudar en la selección del adhesivo adecuado para una determinada resistencia, temperatura y ambiente de servicio.

### 13.3 Soldadura blando

La soldadura blando se diferencia de la soldadura fuerte por la temperatura de fusión del material de aporte. Normalmente, la temperatura de la soldadura blando esta por debajo de 450 °C (840 °F). Por lo general, las uniones efectuadas mediante soldadura blando no son tan fuertes y su temperatura de servicio es inferior a la de las uniones de soldadura fuerte.



Evaporador de película descendente de acero inoxidable EN 1.4410 (2507) (Fuente: Gary Carinci, TMR Stainless)

Entre los materiales de aporte típicos de la soldadura blando están las aleaciones estaño-plomo, estaño-antimonio, estaño-plata y estaño-plomo-bismuto. Estos materiales de bajo punto de fusión producen uniones con coloraciones variables de diferente resistencia mecánica y a la corrosión.

Para producir una buena unión por soldadura blando, lo primero es eliminar con un fundente la capa de óxido superficial del acero inoxidable. La alta estabilidad de la capa de óxido protectora de los aceros inoxidables, especialmente de los inoxidables dúplex aleados con molibdeno, puede hacer muy difícil el trabajo del fundente. Los fundentes de tipo ácido típicos pueden contener cloruros. Si se utilizan fundentes con cloruros, deben limpiarse lavándolos con agua, y/o un neutralizador, inmediatamente después de la soldadura blando. Si no se elimina el fundente completamente, existe el riesgo de que se produzca corrosión por picaduras incluso antes de que el equipo entre en servicio.

## 13.4 Soldadura fuerte

El material de aporte de la soldadura fuerte tiene un punto de fusión superior a 450 °C (840 °F). Entre ellos se incluyen aleaciones de plata, de níquel y de cobre. Las aleaciones de plata tienen un punto de fusión más bajo, de 618–705 °C (1145–1300 °F), y las de cobre se sueldan entre 1100–1150 °C (2000–2100 °F), mientras que las de níquel funden a mayor temperatura, hasta 1175 °C (2150 °F). Las uniones soldadas con níquel pueden resistir una temperatura de servicio más elevada que las uniones soldadas con cobre y con plata.

Con los inoxidables dúplex debe evitarse el rango de temperatura entre 705–980 °C (1300–1800 °F). Es, por lo tanto, importante efectuar la soldadura a una temperatura superior a 1040 °C (1900 °F) o inferior a 705 °C (1300 °F). Las uniones soldadas pueden templarse desde temperaturas superiores a 1040 °C (1900 °F).

El material de soldadura fuerte adecuado debe elegirse de acuerdo con la resistencia a la corrosión, temperatura de servicio y resistencia de la unión requeridas. Los materiales para soldadura fuerte de níquel que contienen hasta un 25 % de cromo poseen una cierta resistencia a la corrosión, si bien es inferior a la del inoxidable dúplex EN 1.4462 (2205).

Se sabe que los inoxidables conteniendo nitrógeno son difíciles de unir por soldadura fuerte. Esto podría afectar a los inoxidables dúplex de segunda generación que contienen mayores niveles de nitrógeno. Hay pocos datos disponibles sobre la soldadura fuerte de los inoxidables dúplex, por lo que el fabricante debe experimentar para obtener los parámetros ideales.

Como en la soldadura blanda, hay que eliminar la capa de óxido antes de y durante la operación de soldadura para obtener una buena unión. Una vez más, esto se consigue con un fundente que debe eliminarse después de la soldadura. El procedimiento es similar al de la limpieza después de la soldadura blanda, e incluye el lavado con agua caliente o con un producto químico neutralizante.



Unidad de desulfurización de gases de combustión de acero inoxidable EN 1.4462 (2205) (Fuente: Aperam)

## 14 Limpieza Posterior a la Fabricación

La limpieza posterior a la fabricación de los aceros inoxidable dúplex no es diferente de la limpieza necesaria con otros aceros inoxidable. La limpieza posterior a la fabricación es muy importante, tanto como el control de la temperatura entre pasadas o el empleo de gas de protección durante la soldadura. Un inoxidable que no se haya limpiado debidamente después de la fabricación puede fallar a temperaturas mucho más bajas o en ambientes menos agresivos de lo que lo haría el material base. Esto significa que el superior coste de un material más resistente a la corrosión se desperdicia a menos que tras su fabricación se mantenga o restaure una superficie óptima. Las salpicaduras de soldadura, termo coloración, marcas de rotulador, cebados de arco y mordeduras pueden actuar como rendijas en un ambiente acuoso. Además, también pueden tener un potencial diferente al de la superficie del acero inoxidable, por lo que podrían producirse interacciones galvánicas. Es importante eliminar estas alteraciones de la película pasiva protectora. La Figura 18 muestra un resumen de tales alteraciones, que pueden producirse durante la fabricación, debiendo ser eliminadas antes de que cualquier acero inoxidable entre en servicio.

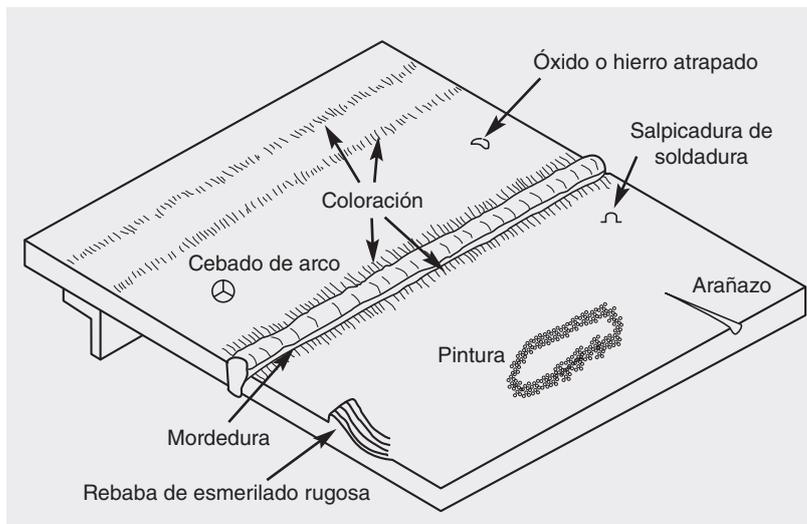


Figura 18: Defectos de fabricación o condiciones superficiales típicas que pueden producirse (Fuente: Nickel Institute Publication 10026)

### 14.1 Marcas de rotulador, pintura, suciedad, aceite

Todos estos contaminantes superficiales pueden actuar como iniciadores de la corrosión por picaduras e intersticios de un acero inoxidable. Además, pueden provocar contaminación carbónica. Si hay que volver a soldar se puede producir la precipitación de carburos. El acero puede sensibilizarse y en servicio aparecer la corrosión intergranular. La contaminación debe eliminarse con disolventes.

### 14.2 Hierro atrapado (contaminación ferrítica)

El hierro atrapado, o hierro libre, aparece durante la fabricación o transporte del acero inoxidable con herramientas de acero al carbono. Si se utilizan herramientas de acero al carbono con los inoxidables, o si se fabrica acero al carbono cerca de donde se almacena el inoxidable, puede transferirse hierro a la superficie del inoxidable. El hierro se oxida posteriormente en un ambiente húmedo, pudiéndose iniciar la corrosión en la superficie del inoxidable. Una solución es evitar cualquier contacto entre el inoxidable y el acero al carbono. Con los inoxidables sólo deben utilizarse herramientas, cepillos y mordazas de acero inoxidable, así como muelas abrasivas nuevas no contaminadas. Es frecuente diferenciarlas en el taller con un código de colores.



Hierro atrapado en el cilindrado de una chapa de acero inoxidable dúplex EN 1.4462 (2205) (Fuente: Gary Carinci, TMR Stainless)

En muchos casos no resulta ni práctico ni económico evitar completamente el uso de utillaje de acero al carbono y evitar la aparición de contaminación ferrítica en el entorno del taller. En estos casos, se acepta que se producirá transferencia de hierro, pero hay que asegurar su eliminación antes de poner el acero inoxidable en servicio. El método para eliminar el hierro puede ser limpieza mecánica, química o una combinación de ambas. El mejor método de limpieza depende del tamaño y forma del equipo, del servicio previsto y de ciertos aspectos prácticos, incluyendo la eliminación de los residuos de la limpieza. Un método de limpieza habitual ha sido un tratamiento químico con ácido nítrico, que disuelve el hierro libre de la superficie de inoxidable, sin atacarlo ni afectar a la película pasiva protectora. Existe, sin embargo, gran número de métodos de limpieza química que permiten obtener los resultados deseados. En ASTM A 380<sup>7</sup> se exponen exhaustivamente los detalles de los métodos de limpieza. Es especialmente importante que el usuario se familiarice con las cuestiones de seguridad expuestas en ASTM A 380.

ASTM A 967<sup>8</sup> (que reemplaza a la Especificación Federal de los Estados Unidos QQP-35c) proporciona información sobre la selección de los ensayos apropiados para demostrar que el tratamiento de pasivado del inoxidable ha sido eficaz. El comprador debe definir el nivel de pasivado a alcanzar y permitir a la agencia que efectúe el tratamiento superficial y la selección del procedimiento apropiado que resulte económico y eficaz.



Buque cisterna para productos químicos con depósitos de acero EN 1.4462 (2205)  
(Fuente: Aperam)

### 14.3 Salpicaduras de soldadura, decoloración, fundente, escoria, cebados de arco

Todos estos defectos pueden producirse durante la soldadura. Pueden actuar como iniciadores de corrosión por intersticios en ambientes conteniendo cloruros, por lo que deberían evitarse o eliminarse después de la soldadura. Las salpicaduras pueden evitarse durante la fabricación utilizando un compuesto anti salpicaduras. La decoloración provoca pérdida de resistencia a la corrosión por la destrucción de la capa pasiva. La decoloración o termo coloración intensa debería evitarse con protección de gas inerte y purgando el reverso de las soldaduras también con gas inerte. En muchos casos, sin embargo, la termo coloración no puede evitarse por completo y hay que eliminarla durante la limpieza final. Las inclusiones de fundente y escoria, así como los cebados de arco, deben eliminarse antes de que el equipo entre en servicio. Las salpicaduras, decoloración, fundente, escoria, cebados de arco y mordeduras pueden eliminarse mediante limpieza mecánica, tal como esmerilado abrasivo fino o con un disco o cepillo de alambre de acero inoxidable. Es importante utilizar una muela abrasiva fina, ya que las marcas de esmerilado profundas pueden causar por sí mismas corrosión en servicio, al permitir la adherencia de depósitos y la formación de intersticios.

La característica distintiva de los inoxidables dúplex es que la termo coloración de las soldaduras tiende a ser delgada, adherente y más resistente a la eliminación química que en el caso de los inoxidables austeníticos con resistencia a la corrosión comparable. La decoloración de las soldaduras puede eliminarse químicamente por decapado; por ejemplo una solución al 20 % de ácido nítrico y 5 % de ácido fluorídrico para el acero EN 1.4462 (2205). Esta solución disuelve el óxido de cromo y también ataca al inoxidable, de manera que elimina la capa que ha perdido cromo. De similares efectos, pero más fáciles de manejar en piezas grandes, pueden utilizarse pastas decapantes en lugar de la solución ácida, teniendo en cuenta que la pasta decapante producirá una solución peligrosa cuando se lave, siendo los procedimientos de seguridad, manipulación y eliminación responsabilidad del usuario. Dependiendo de la resistencia a la corrosión del inoxidable dúplex, podría ser necesario un ácido más o menos agresivo para eliminar la termo coloración.

Las investigaciones han demostrado que la mejor resistencia a la corrosión después de la soldadura se obtiene utilizando el pasivado químico después de la limpieza mecánica.

7 Norma ASTM A 380, práctica para la limpieza, descascarillado y pasivado de piezas, equipos y sistemas de acero inoxidable

8 Norma ASTM A 967, especificación para tratamientos de pasivado químico de piezas de acero inoxidable

## 15 Aplicaciones del Acero Inoxidable Dúplex

### Desulfurización de gases de combustión

Las centrales eléctricas alimentadas con carbón tienen un futuro incierto por la planificación de la calidad del aire a nivel mundial. Se requerirán reducciones adicionales de las emisiones de SO<sub>2</sub> siendo la desulfurización de gases de combustión (FGD) un método para conseguir emisiones con bajo contenido de dióxido de azufre. El uso de lechadas de cal o de piedra caliza para la “depuración húmeda” del dióxido de azufre de un gas de combustión es una tecnología conocida, ya que el sistema básico se ha aplicado a calderas de centrales desde los años 70 del siglo XX. Las depuradoras modernas pueden eliminar más del 90 % del SO<sub>2</sub> de los gases de escape. Las unidades FGD modernas comprenden varias zonas con diferentes temperaturas, concentraciones de cloruros y pH. El inoxidable Tipo EN 1.4462 (2205), se ha utilizado en aplicaciones FGD en Europa y en Asia por su menor coste y mejor resistencia a la corrosión en comparación con los inoxidables austeníticos. Recientemente, el uso de inoxidables dúplex ha ganado aceptación en Norteamérica y este tipo es la elección más popular para la absorción FGD, debido a su alta resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión y alta tenacidad después de la soldadura.

### Desalinización

La desalinización presenta uno de los desafíos más duros para los materiales por ser un proceso corrosivo a alta temperatura y alto en cloruros. La historia de la desalinización es en gran medida una historia de desarrollo de materiales, ya que los clientes intentan equilibrar las necesidades de resistencia a la corrosión con el control de los costes de inversión, para asegurar la financiación de estos proyectos. Durante los primeros pasos de la desalinización, los evaporadores, tanto de flash multietapas (MSF) como por efecto múltiple (MED), se fabricaban con acero dulce. Posteriormente, los evaporadores MSF se revestían normalmente con inoxidable austenítico EN 1.4404 (AISI 316L). Las cámaras MED se revistieron inicialmente con epoxi y posteriormente con acero inoxidable.

Las ventajas del inoxidable dúplex para esta aplicación son mayor resistencia mecánica – doble que la de los tipos austeníticos convencionales – combinada con alta resistencia a la corrosión. Como resultado, los evaporadores de inoxidable dúplex son de menor espesor, requiriendo menos material y menos soldadura. Otras ventajas son una manipulación más sencilla y menor impacto medioambiental global.

El avance decisivo para el inoxidable dúplex se pro-



Unidad de desalinización de agua marina por flash multietapas construida con aceros inoxidables dúplex EN 1.4162 (UNS S32101) y EN 1.4462 (2205) (Fuente: Outokumpu)

dujo en el 2003, cuando se seleccionó el inoxidable dúplex EN 1.4462 (2205) para la instalación de evaporadores totalmente en acero dúplex en la planta MSF de Melittah y la planta MED de Zuara en Libia. La planta, con una capacidad de 4 millones de galones al día (MIGD) se puso en servicio en el 2004.

La siguiente etapa de la evolución de la desalinización utilizando inoxidable dúplex se inició en el 2004, cuando se emplearon dos tipos diferentes de inoxidable dúplex en estructuras de evaporadores – aplicando el EN 1.4462 (2205) altamente resistente a la corrosión para piezas expuestas a las condiciones más severas y el EN 1.4362 (2304) a piezas expuestas a condiciones más livianas.

Recientemente se han construido tres plantas MSF utilizando este concepto, una combinación de EN 1.4462 (2205) y EN 1.4162 (UNS S32101): Taweelah B (Abu Dhabi, 69,2 MIGD de capacidad), Jebel Ali L2 (Dubai, 55 MIGD) y Ras Abu Fontas B2 (Qatar, 30 MIGD). Este concepto utilizando EN 1.4362 (2304) y EN 1.4462 (2205) se aplicó desde el 2003 en plantas MED y, más recientemente, en la construcción de la mayor planta MED hasta la fecha, Al Hidd, en Bahrein, con una capacidad de 60 MIGD.

## Petróleo y gas

En la industria del petróleo y del gas, los aceros dúplex han jugado un papel crucial para soportar condiciones duras. Esto se debe no sólo a su resistencia mecánica y a la corrosión, sino también a que su resistencia a la corrosión por picaduras e intersticios es mayor que la de las aleaciones austeníticas convencionales, con números equivalentes de resistencia a las picaduras (PREN) superiores a 40 en muchos casos.

Las aplicaciones más importantes de los inoxidables dúplex son las líneas de flujo, sistemas de tuberías de proceso y equipos como separadoras, depuradoras y bombas. Bajo el mar, los materiales se utilizan en tubos de producción en el fondo de la perforación, conducciones y colectores, componentes de cabeza de pozo, líneas de flujo y conducciones que transportan petróleo y gas corrosivo. Los inoxidables súper dúplex (25% de cromo) son útiles por su resistencia a las tensiones de diseño, utilizándose en elementos como barras, piezas forjadas y fundidas, láminas, chapas, tubos y dispositivos de fijación. Los inoxidables súper dúplex también tienen excelente resistencia a la fatiga y compatibilidad galvánica con otros aceros inoxidables de alta aleación.

Los cables de acometida se emplean para el control de funciones de cabeza de pozo utilizando líneas hidráulicas, también pueden utilizarse para inyección química. Desde que estos cables de acero se introdujeron en el mercado, los inoxidables dúplex han sido los más utilizados. Recientemente se tiende a efectuar prospecciones a mayores profundidades marinas, siendo necesarios cables más largos. Aumentando la resistencia del material se reduce el peso del cable, lo que permite longitudes mayores. También se tiende a utilizar los cables en aguas más cálidas y a desarrollar conceptos en los que se introduce un tubo de subida en el cable. Por ello, la demanda de resistencia mecánica y a la corrosión ha

aumentado. Se han desarrollado, para su uso en cables, nuevos inoxidables hiper dúplex con mejor resistencia mecánica y a la corrosión que la de los inoxidables súper dúplex.

## Biocombustibles

En tierra, los biocombustibles (especialmente el etanol) son un sector donde el uso de los tipos dúplex está creciendo. En la planta NExBTL de biomasa a líquido en Singapur se ha utilizado el inoxidable 1.4462 (2205) y la empresa holandesa Oostwouder Tank- & Silobouw BV seleccionó el EN 1.4162 (UNS S32101) en el parque de depósitos para Noba Vetveredeling BV en un proyecto de biocombustibles a gran escala del Puerto de Ámsterdam. El EN 1.4162 (UNS S32101) también se especificó para recipientes y tuberías de la ampliación de la planta de etanol de Agroetanol en la isla de Händelö, Suecia. Los tipos de inoxidable dúplex de baja aleación se han utilizado para reemplazar los inoxidables austeníticos de la serie 300 en muchas aplicaciones de servicio de etanol.

## Alimentos y bebidas

El inoxidable dúplex de baja aleación también está demostrando su potencial en las industrias alimentaria y de bebidas. Se está utilizando en dos proyectos en España, un almacén de alimentos y otro de vino. En el puerto de Barcelona, Emypro S.A. construyó depósitos para almacenar alimentos totalmente en EN 1.4162 (UNS S32101) reemplazando al EN 1.4301/1.4307 (AISI 304/304L). El almacén de vino, construido por el fabricante Español de depósitos Martínez Solé para García Carrión en Daimiel, en el sur de España, es el primero que utiliza el inoxidable dúplex: el EN 1.4162 (UNS S32101) y el EN 1.4362 (2304) se utilizaron en la construcción del techo y el nivel superior de todos los depósitos nuevos, como alternativa de menor coste al EN 1.4301/1.4404 (AISI 304/316L).

## Arquitectura

El inoxidable dúplex sigue teniendo un importante papel en la construcción de puentes, donde las condiciones de corrosión y salinidad se combinan con la necesidad de una alta resistencia para soportar cargas. Dos ejemplos recientes en Asia son el Puente Stonecutters, en Hong Kong, y un puente peatonal sobre la Marina Bay de Singapur, en ambos se empleó el inoxidable dúplex EN 1.4462 (2205). En el 2006 se utilizaron para el Puente Stonecutters 2000 toneladas de chapa y tubos dúplex EN 1.4462 (2205). Un fabricante en China realizó el acabado de los segmentos de la envoltura a partir de chapas personalizadas. Las chapas se pulieron y granallaron para obtener el nivel de reflexión óptimo tanto durante el día como durante la noche.



Tubos umbilicales de EN 1.4410 (2507) para aplicaciones de gas y petróleo offshore (Fuente: Sandvik)



**Puente Stonecutters, Hong Kong (Fuente: Ove Arup & Partners)**

El Helix, puente peatonal sobre la Marina Bay de Singapur, también utilizó 570 toneladas de inoxidable dúplex. El asombroso diseño de este puente incluye dos elementos tubulares en espiral de inoxidable que recuerdan la estructura del ADN, en sus dobles hélices y estructuras de soporte se utilizan tubos y chapas de dúplex EN 1.4462 (2205) respectivamente. Las superficies de inoxidable proporcionan iluminación nocturna al reflejar las luces programadas para resaltar el diseño.

El tejado de acero inoxidable más grande del mundo, en el aeropuerto internacional New Doha de Qatar, se construyó con inoxidable dúplex de baja aleación con molibdeno (S32003). La característica más sorprendente de la terminal es su enorme tejado ondulado. Su superficie es de aproximadamente 195 000 metros cuadrados (2,1 millones de pies cuadrados) y se utilizaron alrededor de 1600 toneladas métricas (3,5 millones de libras) de inoxidable dúplex. Para la selección del tipo de inoxidable tuvieron que tenerse en cuenta varios factores. El más importante fue la cercanía del aeropuerto al mar. El tejado debía resistir no sólo el calor y la humedad habitual en Oriente Medio, sino también la corrosión salina. Otros factores para la selección fueron el coste y una favorable relación resistencia/peso del inoxidable dúplex en comparación con otros tipos.



**“The Helix”, Singapur, con una estructura resistente de acero duplex EN 1.4462 (2205) (Fuente: Financial Dynamics/C. F. Jones)**



**Aeropuerto internacional de New Doha con tejado de acero inoxidable dúplex (Fuente: Qatar Airways)**

## Bibliografía Adicional Recomendada

### Información general

P. Johansson, M. Liljas, A New Lean Duplex Stainless Steel for Construction Purposes, Proceedings of 4<sup>th</sup> European Stainless steel Conference Science and Market, Paris 2002.

M. Liljas, J.Y. Jonsson, S.Wessman, Stress Relief Treatment of 22Cr Duplex Stainless Steel EN 1.4462, Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2005

M. Liljas, 80 Years with Duplex Steel, a Historic Review and Prospects for the Future, Proceedings of 6<sup>th</sup> European Stainless Steel Conference Science and Market, Helsinki, Finland 2008

H. Liu, P.Johansson, M.Liljas , Structural Evolution of LDX 2101 During Isothermal Ageing at 600–850°C, Proceedings of 6<sup>th</sup> European Stainless Steel Conference Science and Market, Helsinki, Finland 2008

Z. Wei, J. Laizhu, H. Jincheng, S. Hongmei, Study of Mechanical and Corrosion Properties of a Fe-21.4Cr-6Mn-1.5Ni-0.24N-0.6Mo Duplex Stainless Steel, Materials Science and Engineering A, 2008, 497: 501–504

J. Charles, Why and Where Duplex Stainless Steels, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 29.

M.G. Mecozzi, M. Barteri, Effect of Alloying Elements and Impurity on Hot Ductility of 23% Cr 4% Ni Stainless Steel, 5<sup>th</sup> World Conference Duplex Stainless Steels, Conference Proceedings, KCI Publishing, 1997, p. 1011–1016.

J. Charles, Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 3 and p. 151.

F. Dupouiron, S. Faucheur, and G. Varvat, Fabrications of Process Equipment in Duplex Stainless Steels, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 621.

C. W. Kovach, High-Performance Stainless Steels, Nickel Development Institute Reference Book Series No 11021, Toronto, Canada, 2000

### Metalurgia física

R. Sanchez, I. Moreno, J. Amagro, J. Botella, Effects of Composition and Thermal History on the Phase Balance and Elements Distribution of Standard and Modified Duplex Stainless Steel, 4<sup>th</sup> Stainless Steel Science and Market Congress, Conference Proceedings, Paris 2002, p. 108–113.

J.-O. Nilsson, The Physical Metallurgy of Duplex Stainless Steels, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 73.

J.-O. Nilsson, The Use of Modern Physical Metallurgy in the Development and Characterization of Special Stainless Steels, Journal de Physique, 4, 1993, Vol. 3, Number 7/V1, p. C7-67–C76.

B. Josefsson, J.-O. Nilsson and A. Wilson, Phase Transformations in Duplex Steels and the Relation Between Continuous Cooling and Isothermal Heat Treatment, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 67.

## Mecanizado

C. Bergqvist, J. Olsson, Machining in the New Duplex Grade LDX 2101-Easier Than Expected. Proceedings of Duplex 2007, Grado, Italy 2007.

B. Pellegrini, B.N. Di Caprio and R. Pacagnella, Tool Performance in Continuous Cutting of Duplex Stainless Steel, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 175.

C.G. Carlborg, Å. Nilsson and P-Å. Frandlind, Machinability of Duplex Stainless Steel, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 685.

## Soldadura

F. Hägg, M.Liljas, B.Holmberg, The welding consequences of replacing austenitic with duplex stainless steel. Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2007

C. Baxter, M.Young, Practical aspects for production welding and control of duplex stainless steel pressure and process plants. Proceedings of Duplex America, Houston, TX, 2000

C. Baxter, N.A McPherson, High-productivity welding of duplex stainless steel. Proceedings of Duplex America, Houston, TX, 2000

B. Holmberg, M.Larén, Welding and applications of the new lean duplex steel LDX 2101. IIW Annual meeting, Prague, Czech Republic, 2005.

C. Eriksson, P.Johansson, M.Liljas, E.M. Westin, Mechanical properties of welds in the new lean duplex stainless steel LDX 2101. Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2003

L. Duprez, B. De Cooman, N. Akudt, Microstructure Evolution During Isothermal Annealing of a Standard Duplex Stainless Steel Type 1.4462, Steel Research, 71, 2000, No.10, p. 417–422

L. van Nassau, H. Meelker, F. Neessen and J. Hilkes, Welding duplex and superduplex stainless steel, an update of the guide for industry, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 17.

L. Karlsson, Duplex stainless steel weld metal – effects of secondary phases, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 43.

C. Baxter, L. Tuveson-Carlström, L. Svensson and A. Brorson, The significance of filler metal type on the stress corrosion cracking and fracture toughness of welded 2205 duplex stainless steel, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 279.

B. Holmberg, How to Perform Welding in Duplex Stainless Steels to Obtain Optimum Weld Metal Properties, Stainless Steel World, March 1997, p. 28.

P. Rouault and C. Bonnet, A new shielding gas range for the TIG, plasma and MIG welding of duplex and superduplex stainless steels, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 289.

R.N. Gunn, Intermetallic formation in superduplex stainless steel heat affected zone, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 335.

L. Karlsson, S.L. Andersson and S. Rigdal, Welding superduplex stainless steels with Ni-base consumables, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 433.

B. Bonnefois, J. Charles, A. Bruyere, and R. Cozar, Welding of super duplex steels: new efficient solutions for joining using Ni alloys filler materials, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 499.

D.N. Noble, W. A. Bruce, and R.N. Gunn, Hot tapping 22% Cr duplex stainless steel, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 471.

K. Yasuda, R.N. Gunn, and T.G. Gooch, Prediction of austenite content in duplex stainless steels weld metals, Paper 26, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

L. Odegard, C-O Pettersson and S-A Fager, The selection of welding consumables and properties of dissimilar welded joints in the superduplex stainless steel Sandvik SAF 2507 to carbon steel and highly alloyed austenitic and duplex stainless steels, Paper 94, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

V. van der Mee, H. Meelker, and L. van Nassau, How to avoid hydrogen cracking in (super) duplex stainless steel weldments, Paper 119, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

M. Liljas, The welding metallurgy of duplex stainless steels, Paper KV, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

D.J. Kotecki and J.L. P. Hilkes, Welding processes for duplex stainless steels, Paper KVI, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

## **Inspección**

F.H. Dijkstra and J.A. de Raad, Non-destructive testing of duplex welds, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 509.

D.J. Kotecki, Ferrite measurement in duplex stainless steel, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 957.

C.I.K. Sinclair and B.W.O. Shepherd, Non-destructive testing of welds in duplex stainless steels, Paper 63, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

J.D. Redmond and R.M. Davison, Critical Review of Testing Methods Applied to Duplex Stainless Steels, *Stainless Steel World*, April 1998, p. 37–45

## Referencias

- 1 J. Charles, Super duplex stainless steels: structure and properties, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, p. 3, 1991.
- 2 R. Sánchez, I. Moreno, J. Almagro, J. Botella, X. Llovet, Effects of Composition and Thermal History on the Phase Balance and Elements Distribution of Standard and Modified Duplex Stainless, Fourth Stainless Steel Science and Market Congress, Paris 2002, Conference Proceedings
- 3 I. Zucato, M. C. Moreira, I. F. Machado and S. M. Giampietri Lebrão, Microstructural Characterization and the Effect of Phase Transformations on Toughness of the UNS S31803 Duplex Stainless Steel Aged Treated at 850 °C, Materials Research Print version ISSN 1516-1439, Mat. Res. vol.5 no.3 São Carlos July/Sept. 2002
- 4 B. Josefsson, J.-O. Nilsson and A. Wilson, Phase Transformations in duplex steels and the relation between continuous cooling and isothermal heat treatment, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 67.
- 5 C. Hounглу and S. Hertzman, Kinetics of Intermetallic Phase Formation in Duplex Stainless Steel and Their Influence on Corrosion Resistance, Report IM-2689, Swedish Institute of Metals Research, Stockholm, Sweden.
- 6 G. Herbsleb and P. Schwaab, Precipitation of Intermetallic Compounds, Nitrides and Carbides in AF 22 Duplex Steel and their Influence on Corrosion Behavior in Acids, Proceedings of Duplex Stainless Steels Conference, ASM, Metals Park, Ohio, 1983, p.15
- 7 L. Iturgoyen and M. Anglada, The Influence of Aging at 475°C on the Fatigue Crack Propagation of a Duplex Stainless Steel, Proceedings of Stainless Steels '91, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan, Vol. 2, p. 746, 1991.
- 8 D. Bauernfeind and G. Mori, Corrosion of Superaustenitic Stainless Steels in Chloride- and Sulfate-Containing Media-Influence of Alloying Elements Cr, Mo, N, and Cu, Proceedings of NACE Corrosion 2003 Conference, Paper 03-257
- 9 P.-E. Arnvig, and W. Wasielewska, Stress Corrosion Behaviour of Highly Alloyed Stainless Steels under Severe Evaporative Conditions, ACOM 3-1993, Avesta Sheffield AB, 1993.
- 10 A. Miyasaka, K. Denpo and H Ogawa, Prediction of Application Limits of Stainless Steels in Oilfield Equipment, Proceedings of Stainless Steels '91, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan, Vol. 1, p. 241, 1991.
- 11 J.J. Eckenrod, et al, "Effects of Chemical Composition and Thermal History on the properties of Alloy 2205 Duplex Stainless Steel", New Developments in Stainless Steel Technology, R. A Lula, Ed., ASM 1985.
- 12 R.M. Davison and J.D. Redmond, Paper No. 302, CORROSION/91, NACE International, Houston, Texas, 1991.
- 13 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Paragraph UHA 51.

## Apéndice 1: Designaciones y Nombres de Productos de Aceros Inoxidables Dúplex

UNS No.	Tipo	EN No.	Nombre EN	Japón/JIS	RP China/GB	Corea/KS	Nombre del producto
S31200					022Cr25Ni6Mo2N		44LN
S31260					022Cr25Ni7Mo3 WCuN		DP3 DP12
S31500							3RE60
S32001		1.4482	X2CrMnNiMoN21-5-3				Nitronic 19D
S32003							ATI 2003
S32101		1.4162	X2CrMnNiN21-5-1				LDX 2101 B2101
S32202							UR 2202
S31803 S32205	2205*	1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	SUS 329 J3L	022Cr22Ni5Mo3N	STS 329J3L	SAF 2205 UR 2205 UR 2205+ UR 2205Mo DMV 22-5 ATI 2205 2205 Code Plus Two NAS 329J3L NSSC DX1 DP8 B2205
S32304	2304*	1.4362	X2CrNiN23-4		022Cr23Ni5Mo3N		SAF 2304 UR 2304 B2304
S32506							NAS 64
S32520		1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3				UR 2507Cu
S32550	255*				03Cr25Ni6Mo3Cu2N		Ferrallium 255 UR 2507Cu
S32707							SAF 2707 HD
S32750	2507*	1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	SUS 329 J4L	022Cr25Ni7Mo4N	STS 329 J4L	AF 2507 UR 2507 NAS 74N SAF 2507
S32760		1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4				Zeron 100 UR 2507W NAS 75N
S32808							DP28W
S32900	329	1.4460	X3CrNiMoN27-5-2	SUS 329 J1	0Cr26Ni5Mo2	STS 329 J1	
S32906							SAF 2906

UNS No.	Tipo	EN No.	Nombre EN	Japón/JIS	RP China/GB	Corea/KS	Nombre del producto
S32950							7-Mo Plus
S32960							
S33207							SAF 3207 HD
S39274							DP-3W
S39277							AF918
S82011							ATI 2102
–		1.4655	X2CrNiCuN23-4				
–		1.4477	X2CrNiMoN29-7-2				
–		1.4424	X2CrNiMoSi18-5-3				

\* Nombre común, no es marca comercial, ampliamente utilizado, no asociado a fabricante alguno

## Apéndice 2: Resumen de Especificaciones

### Especificaciones ASTM/ASME

UNS No.	Tipo	A 815	A 959	A 480/M SA 480	A 314	A 240/M SA 240	A 484/M SA 484	A 276 SA 276	A 479/M SA 479
		Accesorios de tuberías	Tipos forjados	Requisitos generales	Palanquillas	Laminado plano	Requisitos generales	Barras, perfiles	Barras, perfiles
S31200			X	X		X			
S31260			X	X		X			
S31803		X	X	X		X	X	X	X
S32001			X	X		X			
S32003			X	X		X			
S32101		X	X	X		X	X	X	X
S32202		X		X	X	X	X	X	X
S32205	2205	X	X	X		X	X	X	X
S32304	2304		X	X		X	X	X	
S32506			X	X		X	X	X	X
S32520			X	X		X			
S32550	255	X	X	X		X	X	X	X
S32707									
S32750	2507	X	X	X		X	X	X	X
S32760		X	X	X	X	X	X	X	X
S32900	329		X	X		X	X		
S32906			X	X		X	X		X
S32950		X	X	X	X	X	X		X
S39274		X	X	X		X			
S39277			X				X		X
S33207									
S82011				X		X			

### Especificaciones EN

EN No.	Nombre EN	EN 10028-7	EN 10088-2	EN 10088-3	EN 10088-4	EN 10088-5	EN 10095	EN 10216-5
1.4362	X2CrNiN23-4	X	X	X	X	X	X	X
1.4655	X2CrNiCuN23-4		X					
1.4460	X3CrNiMoN27-5-2			X		X		
1.4477	X2CrNiMoN29-7-2		X	X	X	X		
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	X	X	X	X	X		X
1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3	X	X	X				X
1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	X	X	X	X	X		X
1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4	X	X	X				X
1.4424	X2CrNiMoSi18-5-3		X	X	X	X		X
1.4062	X2CrNiN22-2							
1.4162	X2CrMnNiN21-5-1				X	X		



## Aceros inoxidables duplex fundidos

UNS No.	Fundiciones ASTM 890, general	Fundiciones ASTM A 995, piezas a presión
J93370	X	
J93372	X	X
J93373	X	
J93345	X	X
J93371	X	X
J92205	X	X
J93404	X	X
J93380	X	X

## Resumen de títulos de especificaciones

Títulos de especificaciones	
A 182 / A 182M	Forged or Rolled Alloy-Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service
A 240 / A 240M	Heat-Resisting Cr and Cr-Ni Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels
A 270	Seamless and Welded Austenitic and Ferritic / Austenitic Stainless Steel Sanitary Tubing
A 314	Stainless Steel Billets and Bars for Forging
A 276	Stainless Steel Bars and Shapes
A 479 / A 479M	Stainless Steel Bars and Shapes for Use in Boilers and Other Pressure Vessels
A 480 / A 480M	General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip
A 484 / A 484M	General Requirements for Stainless Steel Bars, Billets, and Forgings
A 580 / A 580M	Stainless Steel Wire
A 789 / A 789M	Seamless and Welded Ferritic / Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service
A 790 / A 790M	Seamless and Welded Ferritic / Austenitic Stainless Steel Pipe
A 815 / A 815M	Wrought Ferritic, Ferritic / Austenitic, and Martensitic Stainless Steel Fittings
A 890 / A 890M	Castings, Fe-Cr-Ni-Mo Corrosion-Resistant, Duplex for General Application
A 923	Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Wrought Duplex Stainless Steels
A 928 / A 928M	Ferritic / Austenitic Stainless Steel Pipe Electric Fusion Welded with Addition of Filler Metal
A 959	Harmonized Standard Grade Compositions for Wrought Stainless Steels
A 988 / A 988M	Hot Isostatically-Pressed Stainless Steel Flanges, Fittings, Valves, and Parts for High Temperature Service
A 995 / A 995M	Castings, Austenitic-Ferritic (Duplex) Stainless Steels for Pressure-Containing Parts
API 650	Welded Steel Tanks for Oil Storage
NSF / ANSI 61	Drinking Water System Components
NACE MR0175	Sulphide stress cracking resistant material for oil field equipment
EN 10028-7	Flat products made of steels for pressure purposes - Part 7: Stainless steels
EN 10088-2	Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes

## Títulos de especificaciones

EN 10088-3	Stainless steels – Part 3: Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes
EN 10095	Heat resisting steels and nickel alloys
EN 10216-5	Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 5: Stainless steel tubes
EN 10217-7	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 7: Stainless steel tubes
EN 10222-5	Steel forgings for pressure purposes – Part 5: Martensitic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels
EN 10250-4	Open die steel forgings for general engineering purposes – Part 4: Stainless steels
EN 10263-5	Steel rod, bars and steel wire for cold heading and cold extrusion – Part 5: Technical delivery conditions for stainless steels
EN 10272	Stainless steel bars for pressure purposes
EN 10296-2	Welded circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Stainless steel
EN 10297-2	Seamless circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Stainless steel
EN 10312	Welded stainless steel tubes for the conveyance of aqueous liquids including water for human consumption – Technical delivery conditions
EN ISO 8249	Welding – Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr-Ni stainless steel-weld metals
VdTÜV WB 418	Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4462
VdTÜV WB 496	Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4362
VdTÜV WB 508	Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4410



INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION

Con el soporte de:  
International Stainless Steel Forum ([www.worldstainless.org](http://www.worldstainless.org))  
Euro Inox ([www.euro-inox.org](http://www.euro-inox.org))

ISBN 978-1-907470-02-8

