

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO DE
SOLDADURA PARA ACEROS INOXIDABLES
DUPLEX Y SUPERDUPLEX EN APLICACIONES
OFFSHORE**

**(Development of a Welding Procedure
Specification for Duplex and Superduplex
stainless steel for offshore applications)**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Camilo Alexandro González Jara

Septiembre - 2016

TÍTULO	Desarrollo de un procedimiento de soldadura para aceros inoxidables Duplex y SuperDuplex en aplicaciones offshore		
AUTOR	Camilo Alejandro González Jara		
DIRECTOR / PONENTE	Isidro Alfonso Carrascal Vaquero		
GRADO EN INGENIERÍA	<i>Mecánica</i>	FECHA	20/09/2016

PALABRAS CLAVE

Procedimiento, soldadura, inoxidable, Dúplex, SuperDuplex.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las restricciones que la IMO (International Maritime Organization) ha establecido en los últimos años a las emisiones contaminantes de los buques ha llevado a las grandes navieras a adaptar su flota para reducir sus emisiones.

Entre las posibles soluciones que existen en el mercado, la más empleada es la instalación de sistemas depuradores de los gases de escape (scrubbers), que requieren la fabricación e instalación de líneas de descarga de agua ácida, en acero inoxidable SuperDúplex.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El objetivo del presente proyecto es desarrollar un procedimiento de soldadura que nos permita llevar a cabo la fabricación de líneas de tubería en acero inoxidable Dúplex y SuperDúplex.

Una especificación de procedimiento de soldadura es un documento que provee las directrices para realizar la soldadura de un material de acuerdo con los requerimientos de una determinada norma, indicando tanto las variables esenciales como no esenciales y las suplementarias. Este documento proporciona la información necesaria para orientar al soldador y asegurar el cumplimiento de la norma. Un procedimiento de soldadura validado por una Sociedad de Clasificación constituye, en el ámbito marino, una garantía de calidad en la ejecución de la unión y, por ende, en la producción de soldadura.

Se partirá, por tanto, de un estudio del material protagonista de nuestro proyecto, determinando sus características y propiedades principales para, a continuación, definir la técnica que se empleará o, dicho de otro modo, el proceso de soldeo que se escogerá. Tras esto, se hará un repaso por la normativa general y específica que debemos seguir para obtener los máximos estándares de calidad.

Nuestro proyecto concluirá en la definición de una especificación de procedimiento de soldadura que nos permita la fabricación de tuberías de aceros inoxidables Dúplex y SuperDúplex en las mejores condiciones técnicas y económicas.

CONCLUSIONES / PRESUPUESTO

Este proyecto alcanza su objetivo de definir correctamente las variables necesarias para ejecutar la soldadura de tubos de aceros inoxidables Dúplex y SuperDúplex con la garantía de obtener una unión que cumple los estándares de calidad más exigentes.

El resultado satisfactorio de las pruebas llevadas a cabo y registradas en el Registro de Cualificación (WPQR) desemboca en la elaboración de una especificación de soldadura que cumple todos los requisitos estipulados tanto en la normativa europea como en las reglas específicas del organismo examinador.

El presupuesto total del desarrollo y elaboración del procedimiento, así como la ejecución de los ensayos pertinentes asciende a la cantidad de DOCE MIL SETENTA Y NUEVE EUROS CON OCHENTA Y DOS CÉNTIMOS (12.079,82 €).

BIBLIOGRAFÍA

AENOR. 2005. *UNE-EN ISO 15609-1:2004. Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 1: Soldeo por arco*. Madrid: AENOR.

AENOR. 2005. *UNE-EN ISO 15614-1:2004. Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. Ensayo del procedimiento de soldeo. Parte 1: Soldeo por arco y con gas de aceros y soldeo por arco de níquel y sus aleaciones*. Madrid: AENOR.

AVESTA. 2004. *The Avesta welding manual. Practice and products for stainless steel welding*. Suecia: Edita Västra Aros. ISBN: 91-631-5713-6

BUREAU VERITAS. 2016. *Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units. NR 216, Ch. 5, Sec. 4: Approval of Welding Procedures*. Paris: Bureau Veritas [Consulta: junio de 2016]. Disponible en: erules.veristar.com

COLOMBIER, L.; HOCHMANN, J. 1965. *Aceros Inoxidables. Aceros refractarios*. Traducción por José María Demestre Guasch. Bilbao: Urmo.

DI CAPRIO, G. 1999. *Los Aceros Inoxidables*. Adaptación técnica y traducción por Manuel Forés y Teresa Puig. 2ª ed. Barcelona: Grupinox, D.L. ISBN: 84-8264-145-X

IMOA. 2012. *Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex*. Traducción por Germán Hernández Riesco y José R. Ibars Almonacil. Londres: IMOA. ISBN: 978-1-907470-02-8.

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	9
1.1	<i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i>	9
1.2	<i>OBJETIVO</i>	9
1.3	<i>GLOSARIO</i>	10
2	MATERIALES OBJETO DE ESTUDIO: ACEROS INOXIDABLES.....	12
2.2	<i>CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES</i>	17
2.2.1	Aceros inoxidable martensíticos	18
2.2.2	Aceros inoxidable ferríticos	19
2.2.3	Aceros inoxidable austeníticos	20
2.2.4	Aceros inoxidable austenítico-ferríticos	22
2.3	<i>RESISTENCIA A LA CORROSIÓN</i>	23
2.3.1	Corrosión generalizada	23
2.3.2	Corrosión galvánica.....	23
2.3.3	Corrosión por picaduras e intersticial	24
2.3.4	Corrosión bajo tensión	26
2.3.5	Corrosión por fatiga.....	27
2.3.6	Corrosión intergranular o cristalina.....	27
2.4	<i>SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES</i>	29
2.5	<i>ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX Y SUPERDÚPLEX</i>	31
2.5.1	Composición química	31
2.5.2	Resistencia a la corrosión	32
2.5.3	Propiedades mecánicas.....	34
2.5.4	Cualificación del procedimiento de soldadura	39
2.5.5	Procesos de soldeo.....	39
3	FUNDAMENTOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES.....	47
3.1	<i>SOLDADURA TIG</i>	47
3.1.1	Ventajas y limitaciones	48
3.1.2	Características del proceso.....	48
3.1.3	Parámetros de soldeo principales	48
3.1.4	Electrodo	50
3.1.5	Varillas de material de aporte	51

3.1.6	Gases de protección	51
3.1.7	Gas de respaldo.....	53
3.2	SOLDADURA GMAW.....	53
3.2.1	Ventajas y limitaciones	54
3.2.2	Tipos de transferencia	54
3.2.3	Parámetros de soldeo principales	58
3.2.4	Material de aporte	60
3.2.5	Gases de protección	61
3.3	ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	63
3.3.1	Procesos de soldeo.....	63
3.3.2	Especificación preliminar del procedimiento de soldadura (pWPS)	64
3.3.3	Ensayo del procedimiento de soldadura. Cupón de ensayo	64
3.3.4	Exámenes y ensayos	65
3.3.5	Rango de cualificación	66
3.4	REGLAS DE CLASIFICACIÓN	71
3.4.1	Procesos de soldeo.....	72
3.4.2	Especificación preliminar del procedimiento de soldadura (pWPS)	72
3.4.3	Cupón de ensayo	74
3.4.4	Exámenes y ensayos	74
3.4.5	Rango de cualificación	74
3.4.6	Requisitos adicionales para aceros inoxidables.....	76
3.5	ENSAYOS	76
3.5.1	Situación y obtención de las probetas de ensayo	76
3.5.2	Ensayos no destructivos	77
3.5.3	Ensayo de tracción transversal	77
3.5.4	Ensayo de doblado.....	78
3.5.5	Examen macroscópico	78
3.5.6	Ensayo de impacto.....	79
3.5.7	Ensayo de dureza	79
3.5.8	Niveles de aceptación	80
3.5.9	Contraensayos	81
4	RESULTADOS: PWPS Y WPQR.....	82

4.1	<i>PROCESO DE SOLDEO</i>	82
4.2	<i>MATERIAL BASE</i>	84
4.3	<i>METAL DE APORTE</i>	84
4.4	<i>TÉCNICA DE SOLDEO Y OTROS PARÁMETROS</i>	85
4.5	<i>SOLDEO DEL CUPÓN DE ENSAYO</i>	86
4.6	<i>ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS</i>	86
4.6.1	Inspección visual	87
4.6.2	Inspección superficial de grietas. Inspección por partículas magnéticas	87
4.6.3	Inspección radiográfica	87
4.7	<i>ENSAYOS DESTRUCTIVOS</i>	88
4.7.1	Ensayo de impacto. Ensayo Charpy	88
4.7.2	Ensayo de tracción	88
4.7.3	Ensayo de doblado	88
4.7.4	Ensayo de dureza	89
4.7.5	Examen macrográfico	90
5	CONCLUSIONES: WPS	91
5.1	<i>PROCESO DE SOLDEO</i>	91
5.2	<i>MATERIAL BASE</i>	92
5.3	<i>APROBACIÓN</i>	92
6	PRESUPUESTO	94
6.1	<i>OBSERVACIONES GENERALES</i>	94
6.2	<i>PRESUPUESTOS PARCIALES</i>	95
6.3	<i>PRESUPUESTO TOTAL</i>	97
7	ANEXOS	98
7.1	<i>ANEXO I – FORMATO DE WPQR Y WPS</i>	98
7.2	<i>ANEXO II – INFORMES DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DESTRUCTIVOS</i>	103
7.3	<i>ANEXO III – DIMENSIONES DE PROBETAS DE ENSAYO</i>	114
7.4	<i>ANEXO IV – CERTIFICADOS DE MATERIAL BASE Y DE APORTE</i>	118
7.5	<i>ANEXO V – TABLA DE AGRUPACIÓN DE MATERIALES</i>	131
7.6	<i>ANEXO VI – POSICIONES DE SOLDEO</i>	133

8 BIBLIOGRAFÍA..... 139

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de fases Fe-Cr. Adaptado de Colombier y Hochmann. 1968	12
Figura 2. Ampliación del “bucle gamma” del diagrama Fe-Cr. Conde y Santiago, 1971.....	13
Figura 3. Diagrama Fe-Ni. Adaptado de Colombier, Hochmann y Demestre Guasch, 1968	14
Figura 4. Influencia del Ni en las fases de un acero al 18% de cromo. Conde y Santiago. 1979.....	15
Figura 5. Diagrama de Schaeffler.	18
Figura 6. Variación de las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable martensíticos con la temperatura. Di Caprio. 1999.....	19
Figura 7. Curvas de resiliencia según el tipo de inoxidable. Di Caprio. 1999.	22
Figura 8. Diseños de unión susceptibles de sufrir corrosión intersticial.	25
Figura 9. Diagrama de isocorrosión (0,1 mm/año) en ácido sulfúrico no aireado. IMO A, 2012.....	33
Figura 10. Valores de CCT y CPT de algunos aceros inoxidable. IMO A, 2012.....	33
Figura 11. Comparación de límite elástico de aceros Dúplex, SuperDúplex y AISI 316L.	35
Figura 12. Diseños de unión recomendados para aceros Dúplex y SuperDúplex. IMO A.....	37
Figura 13. Soldeo con protección gaseosa y electrodo no consumible de tungsteno.	47
Figura 14. Soldeo por arco protegido por gas y electrodo de aporte.	53
Figura 15. Onda eléctrica cuadrada para arco pulsado.....	58
Figura 16. Forma y dimensiones del cupón de ensayo para soldadura a tope de tubos. UNE-EN ISO 15614:2004. 2005.....	65
Figura 17. Zonas de extracción de probetas del cupón de ensayo. Bureau Veritas.	77
Figura 18. Diseño de la unión del cupón de ensayo y secuencia de soldeo.....	83
Figura 19. Preparación de bordes del cupón de ensayo: unión a tope en V a 60°.	83
Figura 20. Hilo para soldadura GMAW.	85
Figura 21. Cupón de ensayo.....	85
Figura 22. Probetas sometidas a inspección visual (izqda.) y a inspección magnética (dcha.).....	87
Figura 23. Indentaciones en la probeta de ensayo de dureza.....	89
Figura 24. Resultado del ensayo macrográfico.	90
Figura 25. Tubo de SuperDúplex soldado con proceso TIG.....	91
Figura 26. Soldadura MIG (izqda.) y tubos conformados con chapa de acero Dúplex (dcha.).....	92
Figura 27. Esquema de dimensiones de probeta de ensayo de impacto Reglas de BV.....	115

Figura 28. Esquema de dimensiones de probeta de ensayo de tracción. UNE-EN ISO 4136.	116
Figura 29. Esquema de dimensiones de probeta de ensayo de tracción. Reglas de BV.	117

Índice de tablas

Tabla 1. Especificación de tubería Dúplex.	10
Tabla 2. Especificación de tubería SuperDúplex.	10
Tabla 3. Influencia de diferentes aleantes en las propiedades de los aceros inoxidable.	17
Tabla 4. Efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de un inoxidable AISI 430.	20
Tabla 5. Carácter electrolítico de algunos metales y aleaciones.	24
Tabla 6. Índice PREN de algunos aceros inoxidables representativos.	25
Tabla 7. Propiedades mecánicas de aceros Dúplex convencionales.	35
Tabla 8. Parámetros de soldeo para distintos métodos de transferencia GMAW.	43
Tabla 9. Parámetros de soldeo del proceso FCAW para distintas posiciones.	44
Tabla 10. Parámetros comunes de soldeo SMAW para distintos diámetros de varilla.	45
Tabla 11. Parámetros típicos para arco sumergido en función del diámetro de la varilla.	46
Tabla 12. Ventajas y limitaciones del proceso GTAW.	48
Tabla 13. Ventajas y limitaciones del proceso GMAW.	54
Tabla 14. Ensayos requeridos según norma UNE-EN ISO 15614.	66
Tabla 15. Rango de cualificación según grupo de materiales. UNE-EN ISO 15614:2004.	67
Tabla 16. Rango de cualificación según espesor de acuerdo con UNE-EN ISO 15614.	67
Tabla 17. Rango de cualificación según diámetros de acuerdo con UNE-EN ISO 15614.	68
Tabla 18. Ensayos requeridos según las Reglas de Clasificación de Bureau Veritas.	74
Tabla 19. Rango de aprobación en función del espesor según Reglas de Clasificación de BV.	74
Tabla 20. Límite máximo de dureza Vickers HV10 para cupones de ensayo.	80
Tabla 21. Propiedades mecánicas del acero inoxidable SuperDúplex EN 1.4501.	84
Tabla 22. Parámetros de soldeo seguidos en el registro de cualificación (WPQR).	86
Tabla 23. Resultado de ensayos no destructivos.	86
Tabla 24. Resultados del ensayo de tracción para la homologación del procedimiento.	88
Tabla 25. Resultados de los ensayos de doblado de cara, raíz y lateral para la homologación.	89
Tabla 26. Resultados del examen de dureza.	90
Tabla 27. Parámetros de soldeo establecidos en la especificación preliminar (pWPS).	92

Tabla 28. Dimensiones de probeta de ensayo de impacto según reglas de BV.....	115
Tabla 29. Dimensiones de probeta de ensayo de tracción según UNE-EN ISO 4136.....	116
Tabla 30. Dimensiones de probeta de ensayo de tracción según reglas de BV.....	117
Tabla 31. Agrupación de materiales según Informe Técnico UNE-CEN ISO-TR 15608	132

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El 1 de enero de 2015 entró en vigor la normativa **ECA (Emission Control Area)** que regula el contenido de sulfuros en los gases emitidos a la atmósfera. El comercio marítimo en dichas zonas se verá restringido al uso de combustibles con un contenido en sulfuros inferior al 0,10% a partir de aquella fecha, frente al 1% permitido hasta el 31 de diciembre de 2014.

Este endurecimiento de la norma se enmarca dentro del *Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por los Buques (MARPOL), Anexo VI: Reglas para la Prevención de la Contaminación Atmosférica ocasionada por los Buques*, especialmente, el 14º estatuto, que regula la emisión de óxidos de azufre (SO_x). Los requerimientos fueron consensuados y aceptados en octubre de 2008 por la *Organización Marítima Internacional* (por sus siglas en inglés **IMO**), un organismo especializado perteneciente a la **ONU**.

Las zonas de control de emisiones establecidas en *MARPOL, Anexo VI* para los óxidos de azufre son las siguientes: el Mar Báltico, el Mar del Norte, el Canal de la Mancha, las costas atlántica y pacífica de Estados Unidos y Canadá y la costa caribeña de Estados Unidos.

Los buques que operan en estas zonas, por tanto, deberán cumplir estos requerimientos mediante el uso de combustibles aprobados (más caros que los actuales), el uso del gas como combustible o mediante la instalación de sistemas de limpieza de gases de escape.

1.2 OBJETIVO

En el marco descrito anteriormente, una importante naviera dedicada al transporte de pasajeros ha decidido llevar a cabo un proyecto de renovación del sistema de escape de sus buques, instalando depuradoras o *scrubbers* para la desulfuración de los gases de escape. Dicha instalación conlleva la fabricación y montaje de una línea de descarga de agua ácida en acero inoxidable SuperDúplex, así como la renovación de los conductos de escape en acero inoxidable Dúplex. En las tablas 1 y 2 se muestra un resumen de la especificación del proyecto, donde figuran las características principales de la tubería requerida: dimensiones, material, norma, etc.

Nuestro objetivo es desarrollar un procedimiento de soldadura para los aceros inoxidables **Dúplex** y **SuperDúplex** en aplicaciones off-shore.

El procedimiento de soldadura es un documento que provee las directrices para realizar la soldadura de un material de acuerdo con los requerimientos de una determinada

norma (ASME, UNE o las reglas de una Sociedad de Clasificación), indicando tanto las variables esenciales como no esenciales y las suplementarias también. Este documento proporciona la información necesaria para orientar al soldador y asegurar el cumplimiento de la norma.

Un procedimiento de soldadura validado por una Sociedad de Clasificación constituye una garantía de calidad en la ejecución de la unión y, por ende, en la producción de soldadura.

Tabla 1. Especificación de tubería Dúplex.

DN (mm)		Descripción Description	Material Material	Norma Standard	Espesor (mm) Thickness(mm)
De	A				
350	650	Tubo (chapa conformada soldada) Pipe (welded hooped plate)	ASTM A240 1.4462 (Dúplex 2205)	NF-EN 10088	3
700	1400	Tubo (chapa conformada soldada) Pipe (welded hooped plate)	ASTM A240 1.4462 (Dúplex 2205)	NF-EN 10088	4
1500	2000	Tubo (chapa conformada soldada) Pipe (welded hooped plate)	ASTM A240 1.4462 (Dúplex 2205)	NF-EN 10088	5

Tabla 2. Especificación de tubería SuperDúplex

DN (mm)		Descripción Description	Material Material	Norma Standard	Espesor (mm) Thickness (mm)
De	A				
32	50	Tubo sin soldadura sch. 10S Seamless pipe sch. 10S	1.4410 X2CrNiMoN25-7-4	NF-EN 10088	2,77
65	100	Tubo sin soldadura sch. 10S Seamless pipe sch. 10S	1.4410 X2CrNiMoN25-7-4	NF-EN 10088	3,05
125	150	Tubo sin soldadura sch. 10S Seamless pipe sch. 10S	1.4410 X2CrNiMoN25-7-4	NF-EN 10088	3,4
200	200	Tubo sin soldadura sch. 10S Seamless pipe sch. 10S	1.4410 X2CrNiMoN25-7-4	NF-EN 10088	3,76
250	250	Tubo sin soldadura sch. 10S Seamless pipe sch. 10S	1.4410 X2CrNiMoN25-7-4	NF-EN 10088	4,19

1.3 GLOSARIO

A continuación, se incluye un breve glosario con las definiciones más comunes que se emplean en este documento.

Procedimiento de soldeo: Documento que recoge el programa de acciones que se deben seguir para la realización de una soldadura, incluyen procesos de soldeo, referencias a los materiales, consumibles, preparación, entre otros.

Especificación de procedimiento de soldeo preliminar (pWPS): Documento que contiene las variables requeridas del procedimiento de soldeo que tiene que ser cualificado mediante uno de los métodos que se describen en la norma UNE-EN ISO 15607.

Especificación de procedimiento de soldeo (WPS): Documento que ha sido cualificado por uno de los métodos descritos en la norma UNE-EN ISO 15607.

Registro de cualificación de procedimiento de soldeo (WPQR): Registro que comprende todos los datos necesarios para la cualificación de una especificación de procedimiento de soldeo preliminar.

Metal base: Material(es) que se van a unir mediante soldeo.

Consumible: Material consumido en la realización de una soldadura, incluidos materiales de aporte y materiales auxiliares.

Variable esencial: Condición de soldeo que requiere cualificación.

Variable no esencial: Condición de soldeo indicada en la WPS pero que no requiere cualificación.

Rango de cualificación: Extensión de la cualificación para una variable de soldeo esencial.

Cupón de ensayo: Conjunto soldado que se utiliza para realizar ensayos.

Probeta: Parte del cupón de ensayo cortada para llevar a cabo un ensayo destructivo especificado.

TIG: Siglas de **Tungsten Inert Gas**, proceso de soldeo por arco con gas inerte y electrodo de wolframio.

GTAW: Siglas de **Gas Tungsten Arc Welding**, otra denominación para el proceso TIG.

MIG: Siglas de **Metal Inert Gas**, proceso de soldeo por arco con gas inerte y electrodo consumible.

GMAW: Siglas de **Gas Metal Arc Welding**, otra denominación para el proceso MIG.

2 MATERIALES OBJETO DE ESTUDIO: ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidables son aleaciones a base de hierro, cromo, carbono y otros elementos, principalmente el níquel, el molibdeno, el manganeso, el silicio, el titanio, etc., que les confieren una resistencia particular a algunos tipos de corrosión. Naturalmente, la influencia de los diversos elementos produce variaciones distintas de las características intrínsecas de los diversos tipos. La norma **UNE-EN 10088** define a los aceros inoxidables como aquellas aleaciones ferríticas que contienen cromo en una proporción mínima del 10,5%.

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables se debe principalmente a la presencia de cromo. En cantidades relativamente pequeñas, en torno al 5%, mejora ya la resistencia, pero solamente a partir del 10% podemos hablar con propiedad de aceros inoxidables. La acción del cromo se presenta mediante la formación de una delgada capa de óxido sobre el metal que es impermeable e insoluble en medios corrosivos. Esta capa se forma en medios oxidantes y se reconstruye cuando resulta dañada, siempre que el ambiente sea lo suficientemente oxidante. La adición de níquel aumenta la resistencia en los medios ligeramente oxidantes o no oxidantes y, además, su presencia modifica la estructura del acero y permite obtener aleaciones dotadas de mejores características mecánicas.

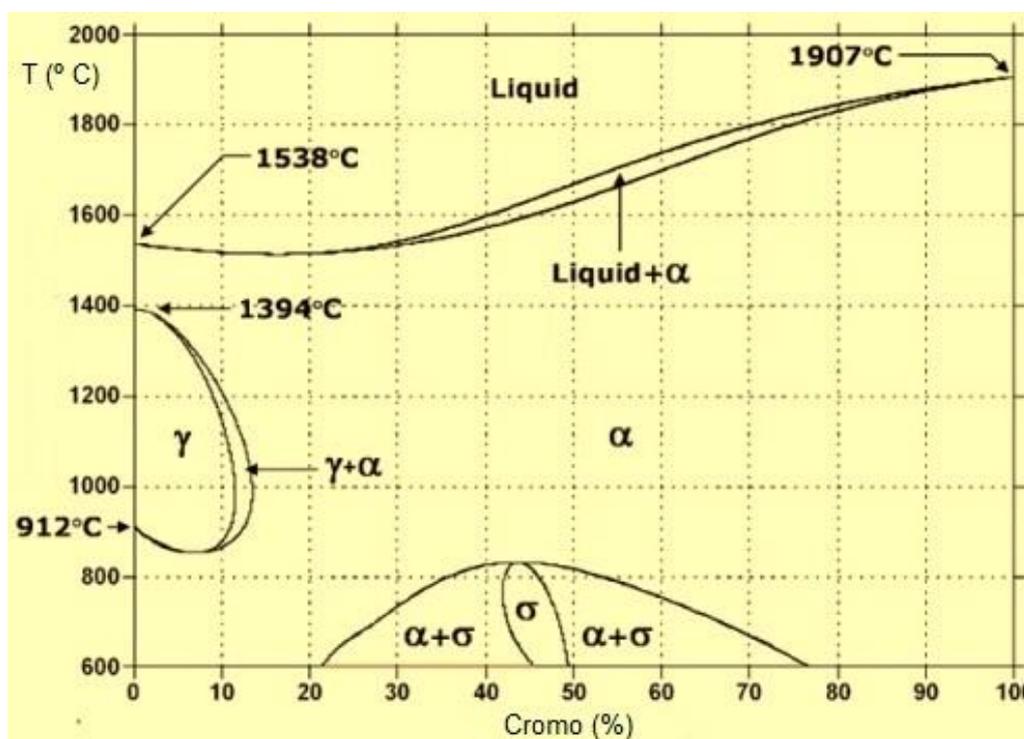


Figura 1. Diagrama de fases Fe-Cr. Adaptado de Colombier y Hochmann. 1968

Los aceros inoxidable son aleaciones complejas en las que entran en juego múltiples elementos, tales como el níquel y el cromo, entre otros. Por tanto, será conveniente considerar el efecto de estos dos elementos principales en las transformaciones alotrópicas del hierro.

Influencia del Cromo

Como hemos comentado anteriormente, el cromo es el elemento fundamental de los aceros inoxidable.

Considerando el diagrama de fases hierro-cromo (fig. 1) podemos observar la acción *alfágena* del cromo; es decir, aumenta el campo de existencia del hierro α en detrimento del hierro γ . Observándolo, se advierte una zona de hierro γ llamada "bucle gamma" entre 910° C y 1400° C en la zona de bajo contenido de cromo, debida a la acción del cromo.

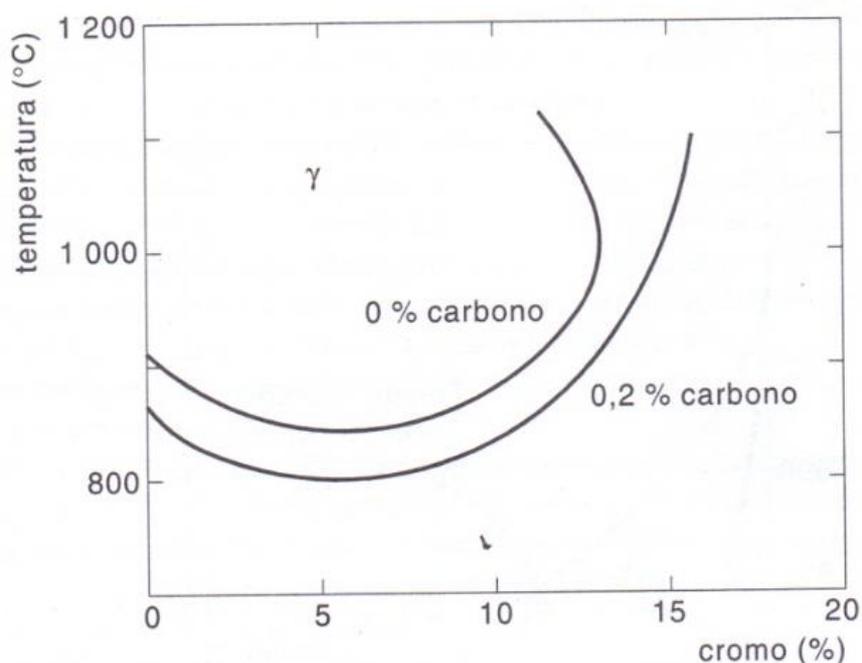


Figura 2. Ampliación del "bucle gamma" del diagrama Fe-Cr. Conde y Santiago, 1971

Analizando el diagrama, observamos que el primer punto de transformación $\alpha \rightarrow \gamma$ se sitúa alrededor de 910° C para hierro puro y, conforme se añade cromo, la temperatura va descendiendo hasta alcanzar el punto mínimo del bucle, en torno a 840° C y un 6,5% de cromo. A partir del 12 o 13% de cromo no hay ningún punto de transformación. Esto significa que las aleaciones permanecen en estado alfa, formando un tipo de aleación que no permite la regeneración del grano mediante tratamiento térmico. Si tenemos en cuenta ahora la influencia del carbono en el diagrama Fe-Cr, vemos que el campo de existencia de hierro

gamma se amplía, evidenciando así su carácter *gammágeno*. En la figura 2, que es una ampliación de la parte inferior de la zona de existencia de hierro γ , podemos observar como la existencia de un 0,2% de carbono provoca la existencia de austenita estable para proporciones de cromo superiores al 15%, lo que significa que podemos disponer de aceros inoxidables capaces de ser templados para elevar su dureza.

Existe también, a temperaturas inferiores, una segunda zona importante centrada alrededor del 45% de cromo. Se trata de la aparición de la fase sigma, σ , un compuesto intermetálico Fe-Cr soluble en ferrita cromada alfa por encima de 850° C. En los aceros inoxidables, la presencia de esta fase debe considerarse perjudicial en tanto en cuanto se manifiesta en un endurecimiento y gran fragilidad.

Cabe destacar que existen otros elementos presentes en los aceros inoxidables que también causan el mismo efecto, tales como el silicio, el molibdeno o el titanio.

Influencia del Níquel

El diagrama hierro-níquel (fig. 3) presenta su acción *gammágena* o *austenitizante*. Por un lado, aumenta el campo de estabilidad de la austenita; los aceros con poco carbono que contienen más del 24% de níquel presentan una estructura austenítica a temperatura ambiente. Debido al carbono, que causa el mismo efecto, la cantidad necesaria para obtener una estructura austenítica a temperatura ambiente es tanto menor cuanto mayor sea la cantidad de este. Por otra parte, el níquel aumenta la capacidad de temple de los aceros, al disminuir la velocidad crítica de enfriamiento.

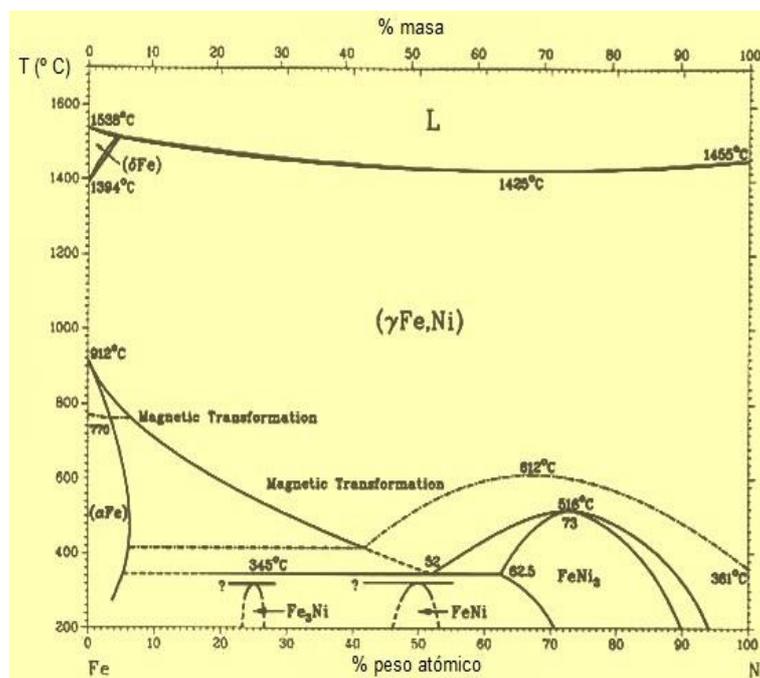


Figura 3. Diagrama Fe-Ni. Adaptado de Colombier, Hochmann y Demestre Guasch, 1968

La influencia del níquel aparece con claridad en la comparación de los siguientes diagramas (fig. 4) que corresponden a un contenido de cromo constante (18%) y a cantidades de níquel crecientes (4 y 8% respectivamente). Conforme aumenta el contenido en níquel, la zona de ferrita delta va trasladándose a zonas de alta temperatura y bajo contenido en carbono hasta aparecer sólo acompañado de austenita. Por otra parte, el campo de existencia del hierro δ es amplio y la austenita se encuentra estabilizada por el níquel y el carbono disuelto, persistiendo a temperatura ambiente, dando lugar a los aceros inoxidable austeníticos.

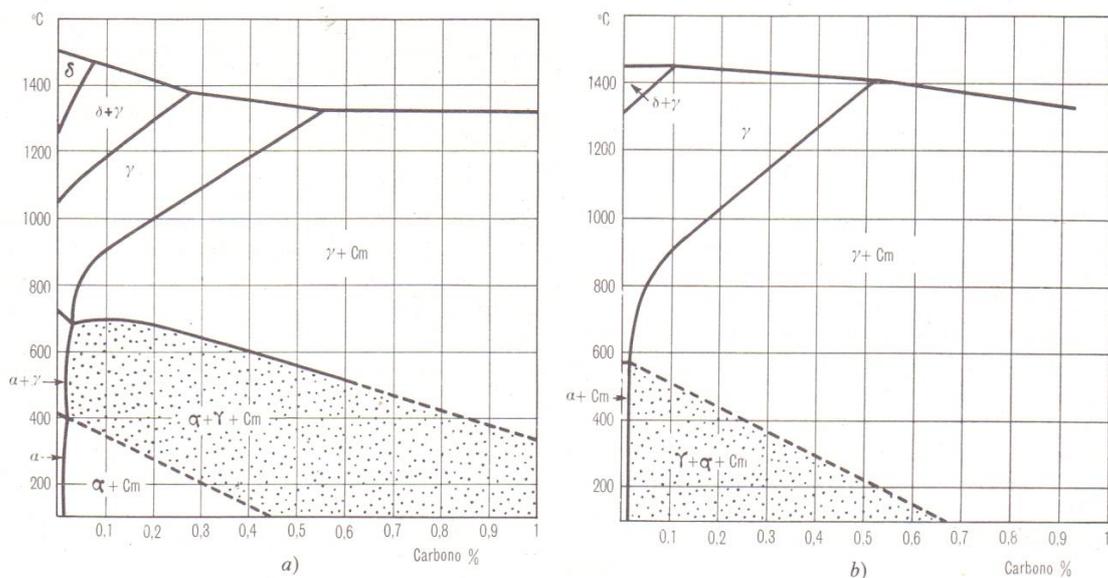


Figura 4. Influencia del Ni en las fases de un acero al 18% de cromo. Conde y Santiago. 1979

En resumen, la acción del níquel sobre los aceros al cromo se centra en dos puntos:

- El níquel ensancha el campo de aparición de la austenita y aumenta su estabilidad; con un contenido de cromo y níquel aceptable se obtienen aleaciones que son austeníticas a temperatura ambiente.
- El níquel desplaza la estabilidad de la fase sigma hacia contenidos de cromo inferiores y hacia temperaturas superiores.

Otros elementos con estas mismas características son el carbono, el manganeso o el nitrógeno.

Otros elementos de aleación

A los aceros inoxidable se añaden, también, otros elementos para modificar sus propiedades.

- El silicio aumenta la resistencia de los aceros frente al oxígeno, el aire y los gases

oxidantes calientes. Actúa sobre la estructura de manera análoga al cromo.

- El aluminio empleado en los aceros resistentes al calor se comporta como el silicio. En presencia de níquel puede formar compuestos cuya precipitación da lugar a endurecimientos estructurales.
- El molibdeno influye sobre la pasividad y la resistencia química de los aceros inoxidable. Es un elemento alfégeno que, en aceros martensíticos, disminuye la capacidad de temple y, en los austeníticos, favorece la resistencia mecánica en caliente.
- El wolframio favorece las características mecánicas de los aceros austeníticos.
- El manganeso, como elemento gammágeno, aumenta la estabilidad de la austenita después del enfriamiento.
- El nitrógeno actúa en los aceros al cromo o al cromo-níquel de una manera análoga al carbono. Se emplea para compensar la reducción de níquel en aceros austeníticos.
- El cobre se añade en ciertas ocasiones para mejorar su resistencia a la corrosión. Convierte en austeníticos los aceros.
- El titanio y el niobio, en aceros austeníticos, evitan la precipitación del carburo de cromo durante los enfriamientos lentos, por lo tanto, impide la disminución de cromo en el metal.
- El cobalto se emplea en aceros resistentes al calor, modificando los procesos de transformación y precipitación sin ejercer ninguna influencia sobre la estructura.
- Otros elementos como el boro mejoran la resistencia a la fluencia. El azufre, el selenio y el fósforo facilitan el mecanizado.

En la tabla 3 se puede ver un pequeño resumen del efecto de los aleantes más comunes.

Tabla 3. Influencia de diferentes aleantes en las propiedades de los aceros inoxidables.

Elemento de aleación	Efecto sobre el acero inoxidable
Azufre y selenio	Disminuye la resistencia
Carbono	Disminuye la resistencia, especialmente en condiciones de sensibilización
Cromo	Aumenta la resistencia
Molibdeno	Aumenta la resistencia
Níquel	Aumenta la resistencia
Nitrógeno	Aumenta la resistencia
Silicio	Disminuye la resistencia; la aumenta en presencia de molibdeno
Titanio y niobio	Disminuyen la resistencia en cloruro férrico; sin efecto ante otros agentes agresivos

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Se ha dicho que los aceros inoxidables son aleaciones de hierro, carbono y cromo con al menos un 10,5% y que pueden tener otros elementos, entre los cuales se encuentra típicamente el níquel. Existen diagramas ternarios (v.gr. Fe-Ni-Cr) que permiten evaluar el efecto combinado de los dos componentes aleados con el hierro.

Visto que el cromo actúa favoreciendo la existencia de hierro α y el níquel, en sentido opuesto, beneficiando la de hierro γ , debemos prever la existencia de diversas soluciones sólidas y de zonas de transición en las que coexisten. Esto nos lleva a concluir que tendremos la posibilidad de clasificar los inoxidables en tres familias principales:

- Los aceros inoxidables ferríticos, con estructura ferrítica independiente de la temperatura
- Los aceros inoxidables martensíticos, endurecibles mediante tratamiento térmico.
- Los aceros inoxidables austeníticos, de estructura austenítica estable independiente de la temperatura.

Para determinar la influencia de los diversos elementos en una aleación de acero inoxidable, Schaeffler estableció un diagrama que lleva su nombre, en donde considera la influencia de los elementos *alfágenos* expresados en “Cromo equivalente”:

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

Y la de los elementos *gammágenos* expresados en “Níquel equivalente”:

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

El diagrama de Schaeffler, en principio, no contempla la acción austenitizante del nitrógeno; sin embargo, a medida que se han ido desarrollando aceros inoxidables conteniendo este elemento en cantidades no despreciables, se ha modificado tanto el diagrama como la expresión anterior, tal que así:

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

Aunque el diagrama fue trazado para predecir la estructura resultante en los cordones de soldadura, la extrapolación a la producción de aceros inoxidable es aceptable.

De todas formas, también existen, y de ellos hablaremos posteriormente, aceros inoxidables de estructura Dúplex y SuperDúplex – denominados austenítico-ferríticos –.

2.2.1 Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son, esencialmente, aceros al cromo (11÷18 %) con un contenido de carbono que puede variar entre el 0,08% hasta un máximo de 1,2%, aproximadamente. Además, pueden presentarse pequeñas cantidades de otros elementos de aleación como níquel, en cantidad nunca superior al 2,5%, para conservar su temple cuando el contenido de cromo es alto, o silicio, en el caso de aceros que deben resistir oxidación a altas temperaturas.

Los martensíticos poseen puntos de transformación alotrópica y, por lo tanto, son susceptibles de mejorar sus características mecánicas de resistencia y dureza mediante templado. De hecho, en función de la cantidad de cromo y de carbono en la aleación, se pueden obtener, mediante calentamiento, estructuras completamente austeníticas o con presencia de carburos.

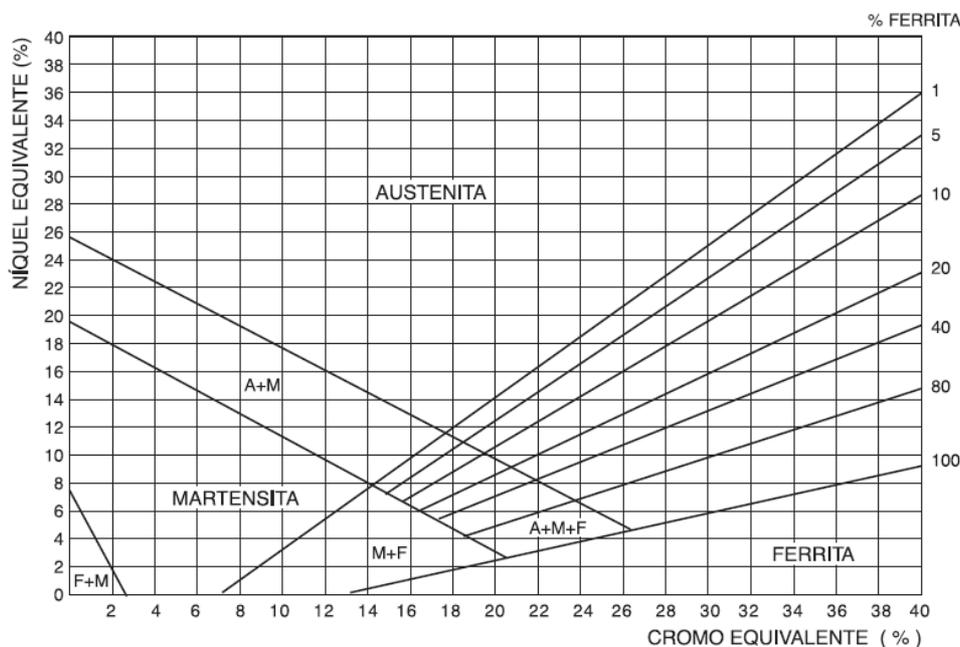


Figura 5. Diagrama de Schaeffler.

Por lo general, los aceros inoxidables martensíticos, a temperaturas inferiores a la de ambiente, presentan una brusca reducción de su tenacidad. La transición entre una rotura

tenaz y frágil se manifiesta tanto más gradualmente cuanto menores son las cantidades de ferrita u otras estructuras intermedias. Asimismo, la temperatura de transición dúctil-frágil también descende. La reducción de la tenacidad viene acompañada por una disminución del alargamiento y, por ende, el límite elástico y la carga de rotura aumentan. Fig. 6.

A altas temperaturas, estos aceros presentan buenas características de resistencia hasta temperaturas de 650° C, lo que los ha hecho muy populares en la construcción de palas de turbinas a vapor.

2.2.2 Aceros inoxidables ferríticos

La ferrita es la solución sólida de pequeñísimos porcentajes de carbono en el hierro α , que, en virtud de su retícula atómica (cúbica centrada en el cuerpo, BCC), tiene pocas posibilidades de mantener el carbono en disolución; pudiendo, no obstante, absorber notables cantidades de cromo por sustitución de átomos de dimensiones similares. Por analogía, denominamos ferrita a cualquier solución de otros elementos en el hierro α , y entre ellos, como veremos, ocupará un lugar especial el cromo.

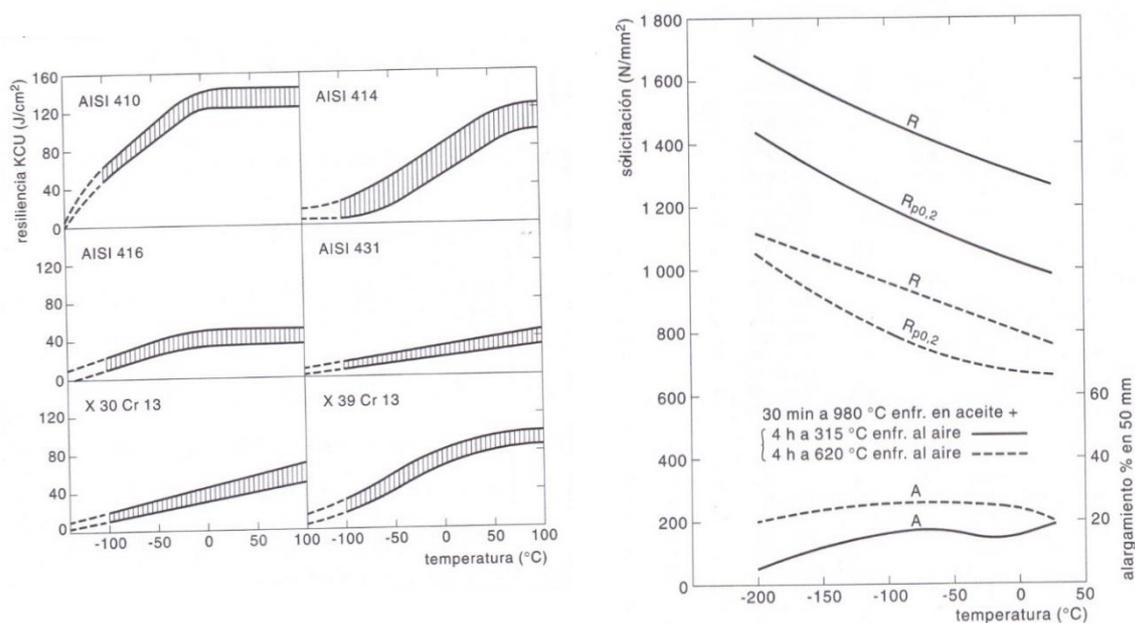


Figura 6. Variación de las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables martensíticos con la temperatura. Di Caprio, 1999.

Los aceros inoxidables ferríticos son, en esencia, aleaciones férricas con un contenido de 16÷30% de cromo y cantidades bajísimas de carbono, en torno al 0,1% y hasta el 0,35% en caso de que el cromo esté en su límite superior. En ocasiones, se presentan otros elementos como el molibdeno. Su estructura es cúbica centrada en el cuerpo en la que pueden encontrarse carburos precipitados. Carece de puntos de transformación ferrita-

austenita durante el calentamiento, por lo tanto, resulta imposible mejorar sus características mecánicas mediante tratamientos térmicos. No obstante, pueden mejorarse practicando trabajos de deformación en frío, capaces de producir acritud. Cabe destacar que algunos aceros ferríticos pueden presentar estructura bifásica y ser, aunque muy levemente, sometidos a endurecimiento por temple. Además, son sensibles al crecimiento del grano por calentamiento a alta temperatura y experimentan ciertas formas de fragilidad.

En tanto en cuanto sus características mecánicas, la acritud no tiene efecto particular sobre las propiedades magnéticas ni sobre la resistencia a la corrosión. No obstante, comporta un aumento del límite elástico, $R_{p0,2}$, mucho más importante para la carga de rotura, lo que aproxima cada vez más los dos valores. Del mismo modo, se produce una reducción del alargamiento.

Tabla 4. Efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de un inoxidable AISI 430.

Características mecánicas	Temperatura de ensayo (° C)				
	20	0	-40	-60	-190
$R_{p0,2}$ (MPa)	266	280	287	308	609
R_m (MPa)	455	483	532	567	630
A (%)	37	37	36	36	0
Z (%)	73	72	72	70	4

Los ferríticos son los que peor se adaptan a aplicaciones a temperaturas inferiores a la temperatura ambiente. En la figura 6 aparece, en efecto, una brusca reducción del alargamiento y la estricción, acompañado, lógicamente, por un aumento del límite elástico y de la carga de rotura.

A altas temperaturas, sus propiedades mecánicas tampoco son particularmente brillantes, siendo sus valores de tensión de rotura y de fluencia más bien bajos. De hecho, la gran mayoría de los aceros ferríticos sufren del fenómeno de fragilización a temperaturas de entre 400 y 600° C y, cuando el contenido de cromo es alto, se verifica la formación de fase sigma, σ , en el intervalo de temperaturas de 550+850° C. No obstante, estos fenómenos solo se manifiestan si el material se enfría, siendo prácticamente nulo si la temperatura en régimen de servicio se mantiene en valores altos.

2.2.3 Aceros inoxidables austeníticos

Como los aceros ferríticos, los aceros inoxidables austeníticos carecen de puntos de transformación alotrópica, o lo que es lo mismo, su estructura es austenítica en todo el ámbito de su existencia.

Los aceros austeníticos al cromo-níquel contienen carbono por debajo del 0,03% hasta aproximadamente 0,25%; cromo en cantidades de entre el 17 y el 26% y níquel entre

el 7 y el 22%. El resto de aditivos – véase molibdeno, titanio o niobio – permiten obtener características concretas.

Su composición está “equilibrada” para que conserven una estructura perfectamente austenítica a temperatura ambiente. Muchos de estos aceros son sensibles a la corrosión intergranular cuando no han recibido un tratamiento térmico estabilizante o cuando su composición no es conveniente.

Los austeníticos forman un grupo bastante amplio del que no se pueden sacar características concretas como en los grupos anteriores. Esto se debe a lo que antes mencionábamos: la adición de determinados elementos implica la obtención de una característica concreta. Así pues, cabe destacar ciertas variaciones que se producen en función de la composición química. Se ha verificado que conforme aumenta el contenido de níquel en los aceros *AISI 301*, *AISI 302*, *AISI 304*, *AISI 305* o *AISI 384* entre otros, presentan menor acritud durante su conformado. De la adición de molibdeno resultan los aceros *AISI 321* o *AISI 348*, que cuentan con una mayor resistencia a la corrosión por picadura (pitting) y a la corrosión bajo tensión. El titanio y el niobio estabilizan a los aceros para evitar, a temperaturas entre los 450° C y los 850° C, precipitados de carburos de cromo (fenómeno de sensibilización) que hacen al acero inoxidable susceptible a la corrosión intercrystalina. Por tanto, los aceros que contengan aquellos elementos, como el *AISI 304* o el *AISI 316*, serán adecuados para la realización de construcciones soldadas, para trabajar a temperaturas de sensibilización o para trabajar en ambientes con peligro de corrosión intercrystalina. También, con una reducción del contenido de carbono – hasta conseguir cantidades o superiores al 0,03% – obtenemos resultados similares, como en los aceros *AISI 304L* y *AISI 316L*.

Para servicios a bajas temperaturas, se han desarrollado aceros inoxidables austeníticos con características especiales para el trabajo en estas condiciones, conocidos como *aceros criogénicos*. Del mismo modo, para servicios a altas temperaturas, hasta los 1100° C, se emplean otro tipo de aceros austeníticos conocidos como *aceros refractarios*. Los aceros de este grupo, como el *AISI 309*, *AISI 310* o el *AISI 314*, deben esta característica a los elevados contenidos de cromo, níquel y carbono, este último hasta valores de 0,20÷0,25%. Sin embargo, el alto contenido en cromo y las altas temperaturas que soportan – del orden de los 1.000° C – provocan la formación de la fase sigma y su consecuente fragilización.

La presencia de azufre en cantidades indicadas, como en el *AISI 303* o el *AISI 316F*, mejora la maquinabilidad, aunque reduce, en poco, la resistencia a la corrosión y la soldabilidad.

En tanto en cuanto las propiedades mecánicas, a temperatura ambiente se puede concluir que los aceros austeníticos, aun careciendo de características mecánicas elevadas,

ofrecen posibilidad de mejorarlas mediante la deformación en frío. La presencia de nitrógeno conlleva unos elevados valores de resistencia, en comparación con los tipos tradicionales. La tenacidad, el alargamiento y la estricción son, de todas formas, elevadas. La resiliencia de los aceros austeníticos disminuye con la temperatura de manera constante, sin presentar una zona de descenso brusco – zona de transición dúctil-frágil – como en el caso de los anteriores (fig. 7). A fatiga, los austeníticos presentan un incremento del límite de fatiga directamente proporcional al incremento de la carga de rotura. Además, no presentan sensibilidad a las entalladuras.

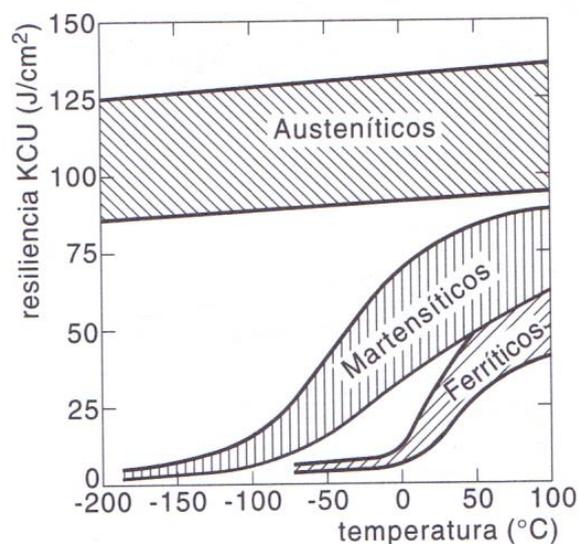


Figura 7. Curvas de resiliencia según el tipo de inoxidable.
Di Caprio. 1999.

2.2.4 Aceros inoxidables austenítico-ferríticos

Los aceros inoxidables austenítico-ferríticos, denominados también aceros bifásicos o Dúplex, se caracterizan por un contenido de cromo siempre mayor al 16% asociado a níquel y molibdeno ($\text{Cr} = 18\div 28\%$, $\text{Ni} = 4\div 7\%$ y $\text{Mo} = 1,5\div 3\%$).

Como su nombre indica, se trata de una familia de aceros cuyo alto contenido en cromo y bajo contenido en níquel, así como la presencia de otro elemento alfégeno como el molibdeno provocan la modificación de la estructura metalográfica por la presencia de islotes de ferrita en una matriz austenítica.

Los aceros Dúplex presentan elevadas características mecánicas – el límite elástico es casi el doble de los aceros austeníticos – y un comportamiento óptimo en casos de corrosión bajo tensión y por picadura (*pitting*). Los aceros Dúplex están indicados para aplicaciones donde se requiera buena soldabilidad y alta resistencia mecánica en ambientes

muy agresivos, como los muy ácidos o en agua de mar. Presentan la ventaja de ser insensibles a la corrosión intercrystalina y de permitir tratamientos de endurecimiento estructural.

Sus propiedades mecánicas varían. La influencia en la relación entre austenita y ferrita se manifiesta tal que, a mayor cantidad de ferrita, empeoran sus características mecánicas y a mayor cantidad de austenita, decrece su resistencia a la corrosión bajo tensión. Normalmente, dicha relación se sitúa en el 50/50%, pudiendo oscilar entre el 30/70% y el 60/40%.

Al igual que los aceros inoxidable austeníticos, los aceros inoxidable Dúplex son una familia de tipos que varían en su comportamiento ante la corrosión en función del contenido de aleantes.

2.3 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

Una de las características peculiares de los aceros inoxidable y uno de los motivos de la continua generalización de su empleo es, sin duda, su gran resistencia a la corrosión. Sería, no obstante, erróneo pensar que los aceros inoxidable pueden soportar a todo el conjunto de fenómenos de degradación conocidos bajo el nombre de corrosión.

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable depende de muchos factores, a saber: sus condiciones intrínsecas – principalmente su constitución analítica y estructural –, del tipo de ambiente en el que se encuentran, del modo como se unen entre sí o con otros materiales, del proceso tecnológico al que han estado sometidos, etc. Dicho con otras palabras, cada acero inoxidable está en disposición de soportar mejor o peor un tipo de agresión.

2.3.1 Corrosión generalizada

La corrosión como tal puede ser uniforme o irregular, según como se presente el frente de ataque, pero se manifiesta, en cualquier caso, en forma de agresión progresiva y a velocidad constante en toda la superficie del acero expuesta al ambiente agresivo. De entre todos, resulta el menos peligroso, puesto que, gracias a sus características, puede calcularse su duración o su pérdida de peso o espesor.

Para este tipo de corrosión, todos los aceros inoxidable presentan una resistencia óptima en contacto con soluciones de ácidos oxidantes, como las de ácido nítrico.

2.3.2 Corrosión galvánica

Este tipo de corrosión, denominada también corrosión por contacto, aparece cuando, en presencia de un electrolito – una solución ácida o, en último caso, la propia humedad

ambiental – dos elementos metálicos están unidos con continuidad eléctrica, formando una pila en la que el que más se corroe es el más anódico. Este fenómeno corrosivo se puede dar incluso en un mismo material metálico cuando, en presencia de un electrolítico, se crean zonas anódicas y catódicas por falta de homogeneidad química o presencia de diversas fases estructurales.

Los aceros inoxidable en estado pasivo son materiales netamente catódicos (nobles), como se puede ver en la tabla 5, referida al agua de mar como electrolito. Por lo tanto, a la hora de unirlos con otros materiales metálicos menos nobles, es necesario prestar atención a la corrosión en estos, más anódicos.

Tabla 5. Carácter electrolítico de algunos metales y aleaciones.

Extremo anódico
Magensio
Zinc
Aluminio
Acero al carbono
Aceros aleados
Fundición de hierro
Aceros inoxidables martensíticos (activos)
Aceros inoxidables ferríticos (activos)
Aceros inoxidables austeníticos (activos)
Latón
Bronce
Cobre
CuNi
Niquel
Inconel
Aceros inoxidables martensíticos (pasivos)
Aceros inoxidables ferríticos (pasivos)
Aceros inoxidables austeníticos (pasivos)
Titanio
Plata
Oro
Platino
Extremo catódico

2.3.3 Corrosión por picaduras e intersticial

La corrosión por picadura, también denominada corrosión puntiforme o *pitting*, es un tipo de corrosión localizada. Es particularmente agresiva y peligrosa, pues actúa en profundidad en pequeñísimas áreas, fáciles de escapar a un control visual, y progresa hasta perforar la parte atacada.

Para discutir la resistencia a la corrosión por picadura es útil introducir el concepto de *temperatura crítica de corrosión por picaduras (CPT)*. Se define como la temperatura a la cual la corrosión por picaduras se iniciará y propagará, detectándose visualmente en unas 24 horas. Esta temperatura es característica de cada tipo de acero inoxidable y de un ambiente específico y, debido al carácter aleatorio de la formación de picaduras y a la sensibilidad de la CPT a ligeras variaciones, se expresa como un rango de temperaturas.

Desde un punto de vista metalúrgico, la corrosión por picaduras se combate seleccionando los aceros inoxidables cuyo estrato pasivo sea más estable y resistente. En general, la máxima resistencia a la corrosión por picaduras la presentan los tipos con elevado contenido en molibdeno, austeníticos y austenítico-ferríticos y los recientemente desarrollados ferríticos *Extra Low Interstitial (ELI)*.

Una herramienta práctica para evaluar la capacidad de un acero de aguantar este tipo de corrosión es el número equivalente de resistencia por picaduras (en inglés *Pitting Resistance Equivalent Number, PREN* o también *Pitting Index, PI*), definido como sigue:

$$\left\{ \begin{array}{ll} PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo & \text{para aceros ferríticos} \\ PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N & \text{para aceros austeníticos} \\ PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 30 \times \%N & \text{para aceros austenítico – ferríticos} \end{array} \right.$$

En la tabla 6 se puede ver el valor del PREN de algunos aceros inoxidable en orden creciente.

Tabla 6. Índice PREN de algunos aceros inoxidables representativos.

Acero	Tipo	PREN	%Cr	%Ni	%Mo	%N
AISI 430	Ferrítico	17	17	-	-	-
AISI 436	Ferrítico	18	17	-	1	0,04
AISI 304	Austenítico	20	18	10	-	0,10
AISI 316	Austenítico	27	17	12	2,5	0,10
X2CrNiMoN22-5-3 (Dúplex)	Austenítico-ferrítico	38	22	5	3	0,22
X2CrNiMoN25-7-4 (SuperDúplex)	Austenítico-ferrítico	47	25	7	4	0,30

De todas formas, en caso de tener que escoger un tipo de acero inoxidable, este índice es meramente orientativo ya que está referido a un material ideal, sin considerar la agresividad del medio de trabajo, la temperatura de servicio u otros aspectos metalúrgicos como el efecto de las fases intermetálicas, las fases no metálicas o el tratamiento térmico inadecuado.

La corrosión intersticial es una corrosión localizada y puede surgir cuando un fabricado presenta intersticios entre dos superficies en contacto de piezas metálicas iguales, de distinto metal o incluso de no metálicas e inertes. En la figura 8 se muestran algunos ejemplos de uniones donde se puede dar este tipo de corrosión.

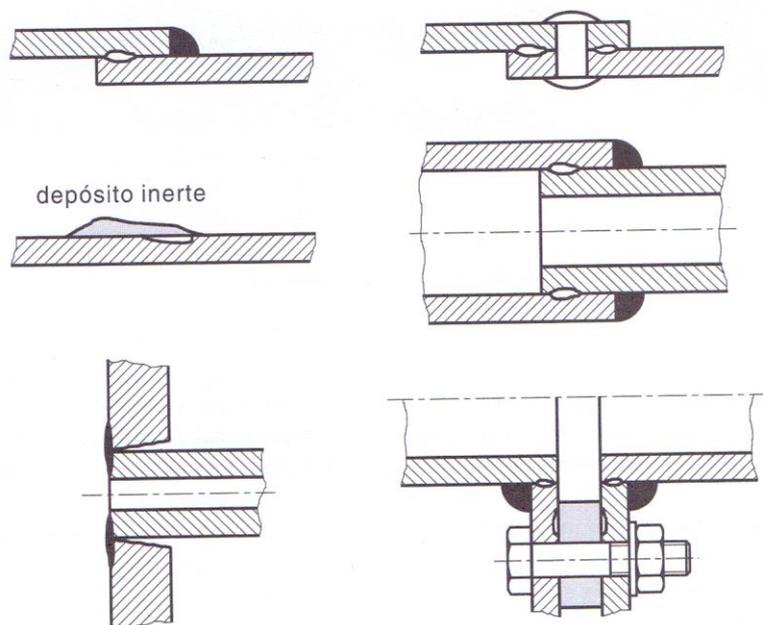


Figura 8. Diseños de unión susceptibles de sufrir corrosión intersticial.

La corrosión intersticial se da cuando la solución en el interior de la fisura, que en un principio es idéntico al ambiente exterior, se va empobreciendo de oxígeno hasta alcanzar una composición lo suficientemente agresiva – crítica para cada tipo de acero – que rompa

la capa pasivante y propicie una rápida corrosión en el interior de la fisura.

De manera análoga a la corrosión por picaduras, existe el concepto de *temperatura crítica de corrosión intersticial (CCT)*. Esta temperatura depende de la muestra específica de acero inoxidable, del ambiente agresor y de la naturaleza del intersticio. En este caso, sin embargo, la dependencia de la geometría hace muy difícil reproducir intersticios en la práctica, por lo que normalmente se asume que la CCT es entre 15 y 20° C menor que la CPT para el mismo acero y el mismo ambiente.

2.3.4 Corrosión bajo tensión

Es un fenómeno de corrosión localizada también conocida como tensocorrosión. Se produce cuando en cierto ambiente agresivo, un material es solicitado mecánicamente en condiciones estáticas o dinámicas, dando lugar a procesos corrosivos con características particulares, diferentes de las que aparecen en condiciones de ausencia de sollicitación.

La corrosión bajo tensión es un fenómeno harto preocupante porque se desarrolla a gran velocidad y, como todas las corrosiones localizadas, sin indicios alarmantes previos. Se detiene cuando cesa el estado de sollicitación y es especialmente peligrosa ya que, cuando se hace visible, el material se encuentra comprometido por la presencia de profundas grietas en el espesor de la pieza. Dichas grietas se ramifican en el interior de la pieza, ya sea atravesando el grano (proceso transgranular) o rodeándolo (proceso intergranular) o ambas y su progresión es prácticamente perpendicular a la dirección de la sollicitación.

Para evitar la tensocorrosión, el mejor sistema es actuar de manera preventiva, evaluando la concentración del medio corrosivo, la temperatura de servicio y sus fluctuaciones y por supuesto, las sollicitaciones posibles. Teniendo en cuenta dichos factores, se debe proceder siguiendo algunas pautas:

- Montar cuidadosamente las piezas para evitar fuerzas de tracción. Por ejemplo, forzamientos de montaje en sistemas de tubería.
- Formar zonas de compresión en zonas traccionadas para descargar la pieza, mediante martillado o granallado.
- Aliviar tensiones residuales del proceso de fabricación mediante tratamientos térmicos muy controlados para evitar la sensibilización.
- Estudiar con precisión las condiciones de servicio en fase de proyecto para evitar situaciones desfavorables.
- Ejecutar las soldaduras con la secuencia apropiada para evitar tensiones perjudiciales en el cordón o en las piezas unidas.

Desde el punto de vista de los aceros, frente a la corrosión bajo tensión, se recomienda lo siguiente:

- Decidirse por aceros con buena resistencia a la corrosión por picaduras: austeníticos con alto contenido en molibdeno como *AISI 316*, *AISI 317*, austenítico-ferríticos, o ferríticos con bajo contenido intersticial (ELI).
- Emplear protección catódica, ya sea con ánodos de sacrificio o corrientes impresas.

2.3.5 Corrosión por fatiga

La corrosión por fatiga es un tipo de tensocorrosión que se da cuando la sollicitación varía cíclicamente en el tiempo, siempre en un ambiente agresivo. En términos cualitativos, la resistencia a fatiga del material se ve ineludiblemente reducida o incluso anulada.

La corrosión por fatiga se manifiesta en toda la superficie del elemento sometido a la acción coincidente del esfuerzo cíclico y la agresión ambiental mediante grietas de progresión transgranular, perpendiculares a la sollicitación repetida y rara vez ramificadas.

Para prevenir la aparición de este tipo de corrosión se ha de tener en cuenta las mismas consideraciones que para la corrosión bajo tensión además de las siguientes:

- Evitar la formación inicial de corrosión por picaduras que puedan provocar concentraciones de tensiones.
- Cuidar el diseño de la pieza, evitando entalladuras, variaciones bruscas de sección, acabados groseros y desequilibrios que puedan también producir vibraciones.

2.3.6 Corrosión intergranular o cristalina

Esta corrosión se considera de tipo selectivo, por cuanto ataca los bordes de los granos de aceros inoxidable que han resultado sensibilizados. Se produce cuando el ataque corrosivo penetra en los bordes de grano, donde se ha producido una variación de composición – precipitación de carburos de cromo – por procesos térmicos. En esta situación, cada grano se separa de los demás y puede ser arrancado por cualquier acción, incluso leve, como la acción de un líquido fluyendo sobre la superficie. En tal estado de disgregación, el material presenta pésimas características de resistencia mecánica y tenacidad.

Cuando el acero ha sufrido sensibilización, precipitan en la superficie de los granos carburos de cromo que empobrecen de tal elemento las zonas adyacentes. En esta situación, las zonas vecinas al contorno del grano se hacen más difíciles de pasivar y son más susceptibles al ataque por un agente corrosivo adecuado. Se crean, pues, en el interior de la

estructura del metal, zonas catódicas (en el interior del grano) y anódicas (los bordes de grano empobrecidos de cromo).

La corrosión intercrystalina aparece cuando el carbono contenido en el acero está en cantidad superior a su límite de solubilidad en la matriz a bajas temperaturas, del orden de 0,02% para aceros austeníticos y del orden de 0,002% para los aceros ferríticos. Por ende, si el calentamiento en el intervalo de sensibilización se efectúa en aceros que contienen carbono en cantidades superiores a las indicadas y el enfriamiento no es suficientemente rápido se obtendrá una precipitación de los carburos de cromo.

El tiempo necesario para la precipitación de los carburos es tanto mayor cuanto menor es la cantidad de carbono presente en los aceros. Este es el motivo de la utilización de los aceros de bajo contenido en carbono en las estructuras soldadas, donde el enfriamiento de la unión no sea muy rápido, porque la precipitación de los carburos de cromo ocurre en un tiempo prolongado y, por consiguiente, se trabaja en condiciones de absoluta seguridad, incluso cuando el enfriamiento de la soldadura sea muy lento. La utilización, en construcciones soldadas, de los tipos estabilizados – que contienen elementos estabilizantes como el titanio o el niobio – está ligada al hecho de que el intervalo de sensibilización para estos aceros es decididamente superior al de los demás tipos y por ello no existe normalmente peligro de sensibilizar la zona próxima a la soldadura. De hecho, la estabilización provoca la precipitación preventiva de los carburos de titanio y niobio que, además de no empobrecer de cromo la aleación, se depositan en el interior del grano y consumen el carbono disponible, inhibiendo un ataque selectivo en el contorno de los granos.

Para evitar el peligro de corrosión intergranular, cuando se opera en ambientes capaces de provocarla, es oportuno tener presentes algunas advertencias:

- Evitar la utilización de materiales sensibilizados o, si lo estuvieran, aplicar un tratamiento térmico de solubilización.
- Utilizar los tipos de aceros inoxidables estabilizados (*AISI 321, 347, 316Ti o 316Nb* entre otros) que pueden permanecer a temperaturas de sensibilización casi indefinidamente.
- Utilizar tipos de inoxidables de bajo contenido en carbono (*304L, 316L, 317L*), aunque, eso sí, estos no pueden resistir indefinidamente a tales temperaturas.

En el caso de las construcciones soldadas en las que no puede practicarse un tratamiento de solubilización y solamente si deben ser empleadas en ambientes que pueden provocar corrosión intergranular, deberemos recurrir entonces a las siguientes opciones:

- Aceros inoxidables de bajo contenido en carbono. Estos aceros no presentan en

las ZAT ninguna precipitación de carburos de cromo, puesto que su tiempo de sensibilización es mucho mayor que el de permanencia a la temperatura de sensibilización por efecto del calentamiento por soldadura.

- Aceros inoxidable estabilizados. Estos no presentan en la ZAT precipitaciones de carburos de cromo, precisamente porque se precipitan primero los elementos estabilizantes (titanio y niobio).

2.4 SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES

La soldadura provoca la fusión localizada de los bordes de unión y del material de aporte. La fusión produce en el material soldado una serie de transformaciones bastante complejas, teniendo en cuenta que el baño de soldadura sufrirá un rápido enfriamiento una vez solidificado.

Como comentamos anteriormente, la previsión de la microestructura final de un cordón de soldadura puede realizarse con una cierta aproximación en función del análisis químico, mediante los parámetros *equivalente cromo* y *equivalente níquel*, y de su posición en los diagramas de Schaeffler y de De Long.

El diagrama de Schaeffler se divide en tres zonas principales, a las que corresponden tres estructuras distintas del cordón de soldadura: la austenítica, la ferrítica y la martensítica. En la frontera de estas, se hallan otras donde se combinan dos o más fases. El diagrama es de notable importancia para definir a priori las posibles estructuras presentes en el cordón de soldadura y, por consiguiente, para la selección del material de aporte adecuado, evitando así la presencia de fases que puedan perjudicar la resistencia a la corrosión o las propiedades mecánicas de la unión.

Por ejemplo, la presencia de ferrita en cordones de unión de aceros austeníticos puede ser beneficiosa a niveles bajos para evitar la formación de grietas en caliente; sin embargo, altos nivel pueden ser perjudiciales para la resistencia mecánica y la ductilidad. Del mismo modo, la presencia de martensita en un cordón provoca la disminución de las propiedades mecánicas de la junta a causa de la formación de zonas duras y frágiles.

Para una correcta previsión de la estructura del cordón se debe tener en cuenta la dilución entre el metal base y el de aporte, que ronda, para soldadura manual, entre el 20÷30% de metal base y el 70÷80% de metal de aporte.

Como consecuencia del ciclo de calentamiento que sufre el material durante la soldadura, se presenta un fenómeno en todos los tipos de aceros inoxidable: el aumento del tamaño de grano. Normalmente sucede en aquellos con estructura monofásica, especialmente en los inoxidable ferríticos, pero también en los austeníticos. Cuando el

calentamiento es notable, puede producirse una disminución de la resiliencia y en ciertos casos, una disminución de la resistencia a la corrosión.

En casos particulares se puede observar el fenómeno de recristalización durante el calentamiento de zonas que presentan tensiones internas. En estas zonas se inicia la formación de nuevos granos hasta obtener una distinta disposición cristalina. En aceros inoxidable ferríticos este fenómeno ocurre de manera frecuente – en la zona afectada térmicamente, ZAT, por encima de 950° C – dando lugar a uniones de baja tenacidad.

La precipitación de carburos de cromo – o sensibilización – se produce en los austeníticos en el intervalo de temperatura comprendida entre 450 y 850° C y puede dar lugar a fenómenos de corrosión intergranular. En una unión soldada, la precipitación tiene lugar en la ZAT cuando las partes que se deben unir permanecen en el intervalo de sensibilización un tiempo prolongado; en el caso de los aceros austeníticos, unos pocos minutos son suficientes. Una solución posible es el empleo de aceros inoxidable con bajo contenido en carbono ($\leq 0,03\%$) o estabilizados con titanio o niobio.

La formación de fase sigma puede originar una disminución de la tenacidad, de la resistencia a la corrosión y de la resistencia a la fluencia. La formación de esta fase puede ocurrir así en aceros inoxidable ferríticos, como en austeníticos con contenidos elevados en cromo. En aceros austeníticos al cromo-níquel la fase sigma puede formarse en un intervalo de temperaturas entre 800 y 900° C con duraciones prolongadas, superiores a las necesarias para realizar soldaduras. No obstante, la presencia de zonas soldadas puede favorecer tales precipitaciones en caso de que la unión trabaje a temperaturas dentro del intervalo de formación de la fase sigma.

Las transformaciones martensíticas son típicas de los aceros martensíticos, en la zona afectada térmicamente, y dependen del valor del contenido de carbono presente en la aleación, o bien del ciclo de calentamiento y enfriamiento en la misma soldadura. Puesto que tales transformaciones pueden provocar la disminución de la tenacidad de la ZAT y la formación de grietas, se recurre a tratamientos de precalentamiento.

También los ferríticos pueden presentar transformaciones martensíticas cuando su composición sea tal que favorezca la formación de islotes austeníticos en intervalos de temperaturas suficientemente elevadas, 850÷900° C, con la consiguiente formación de martensita durante el enfriamiento. Para evitar estos inconvenientes pueden utilizarse aceros ferríticos que contengan aluminio, o bien practicar en la estructura soldada tratamientos de post-calentamiento.

2.5 ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX Y SUPERDÚPLEX

2.5.1 Composición química

Como mencionamos en el apartado anterior, la relación entre austenita y ferrita de un acero Dúplex varía entre el 30/70% hasta el 60/40%, siendo habitual considerar que contiene cantidades iguales de ferrita y austenita.

Un problema típico de los aceros Dúplex es la formación de fases intermetálicas perjudiciales a temperaturas elevadas, como la fase sigma, que precipita en la ferrita de aceros inoxidable con alto contenido en cromo y molibdeno. La adición de nitrógeno retarda significativamente la formación de estas fases, por tanto, es esencial su presencia en forma de solución sólida. A continuación, se presenta el efecto de los elementos de aleación más importantes sobre las propiedades mecánicas, físicas y de corrosión de los aceros inoxidable Dúplex.

- **Cromo.** Normalmente, el contenido mínimo de cromo en los aceros inoxidable Dúplex es del 20%. Un contenido alto de cromo favorece la formación de fases intermetálicas y, por ende, se necesitará más níquel para formar una estructura austenítica o Dúplex (austenítica-ferrítica) que además inhiba la formación de dichas fases, como veremos más adelante. El cromo 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 inoxidable Dúplex que con los austeníticos.
- **Molibdeno.** El molibdeno actúa para apoyar al cromo en la resistencia contra la corrosión por picaduras de los aceros inoxidable. 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 picadura (*pitting*) y por intersticios. El molibdeno es un formador de ferrita y también aumenta la tendencia de los aceros inoxidable a formar fases intermetálicas perjudiciales. Por ello, su contenido se reduce normalmente a menos del 7,5% en los inoxidable austeníticos y del 4% en los Dúplex.
- **Nitrógeno.** El nitrógeno aumenta la resistencia a la corrosión por picaduras y por intersticios de los 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 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. Se añade para compensar la tendencia a formar fase sigma, favorece la formación de austenita y puede remplazar algo de níquel en los austeníticos. 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 Dúplex normalmente se añade nitrógeno y se ajusta el níquel con el fin de conseguir el equilibrio de fases deseado.

- **Níquel.** Su adición retrasa la formación de fases intermetálicas perjudiciales, pero es menos eficaz que el nitrógeno. La presencia del níquel en aproximadamente la mitad de la microestructura de los tipos Dúplex aumenta en gran medida su tenacidad – gracias a la estructura FCC – en comparación con los ferríticos.

2.5.2 Resistencia a la corrosión

En la mayoría de ambientes donde los aceros austeníticos presentan una buena resistencia a la corrosión, lo hacen también los aceros Dúplex. Sin embargo, existen excepciones donde estos son decididamente superiores. Esto se debe a su alto contenido en cromo, beneficioso con ácidos oxidantes, que junto al molibdeno y níquel proporcionan resistencia en ambientes ácidos suavemente reductores. El contenido alto en cromo, molibdeno y nitrógeno también les confiere muy buena resistencia contra la corrosión por picaduras (*pitting*) y por intersticios. Su estructura bifásica supone una ventaja en ambientes con potencial de agrietamiento por corrosión bajo tensión. Si la microestructura contiene al menos un 25-30% de ferrita, los Dúplex son mucho más resistentes a la corrosión bajo tensión. Sin embargo, la ferrita es susceptible a la fragilización por hidrógeno, por lo que su resistencia se ve mermada en ambientes donde el hidrógeno puede incorporarse al metal.

Resistencia a los ácidos y bases

Con el fin de ilustrar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables Dúplex en presencia de ácidos fuertes, la figura 9 proporciona datos de corrosión para soluciones de ácido sulfúrico. En este ambiente, que pasa de ligeramente reductor con concentraciones bajas a oxidante con concentraciones elevadas, los Dúplex superan en rendimiento a muchos austeníticos con alto contenido en níquel. Su resistencia a las condiciones oxidantes hace que los Dúplex sean buenos candidatos para el servicio con ácido nítrico y ácidos orgánicos fuertes, siendo mejores que los típicos *AISI 304* o *316* a altas temperaturas. Los 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 tensión.

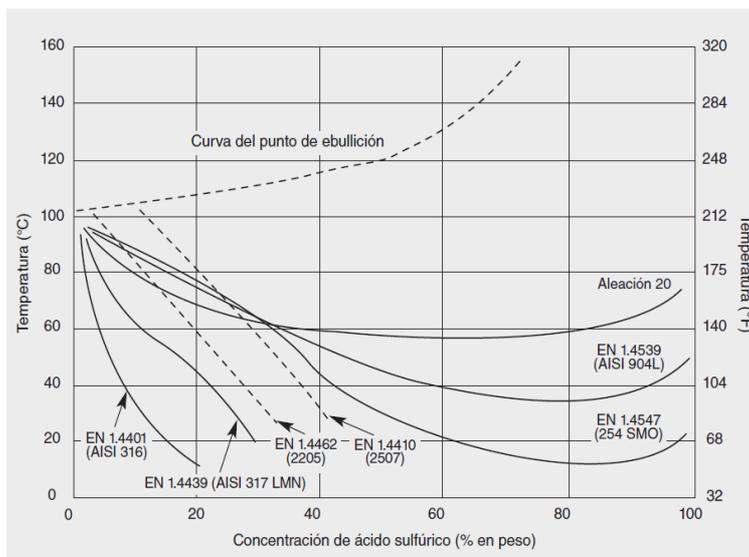


Figura 9. Diagrama de isocorrosión (0,1 mm/año) en ácido sulfúrico no aireado. IMO A, 2012

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

Resistencia a la corrosión intersticial y por picaduras

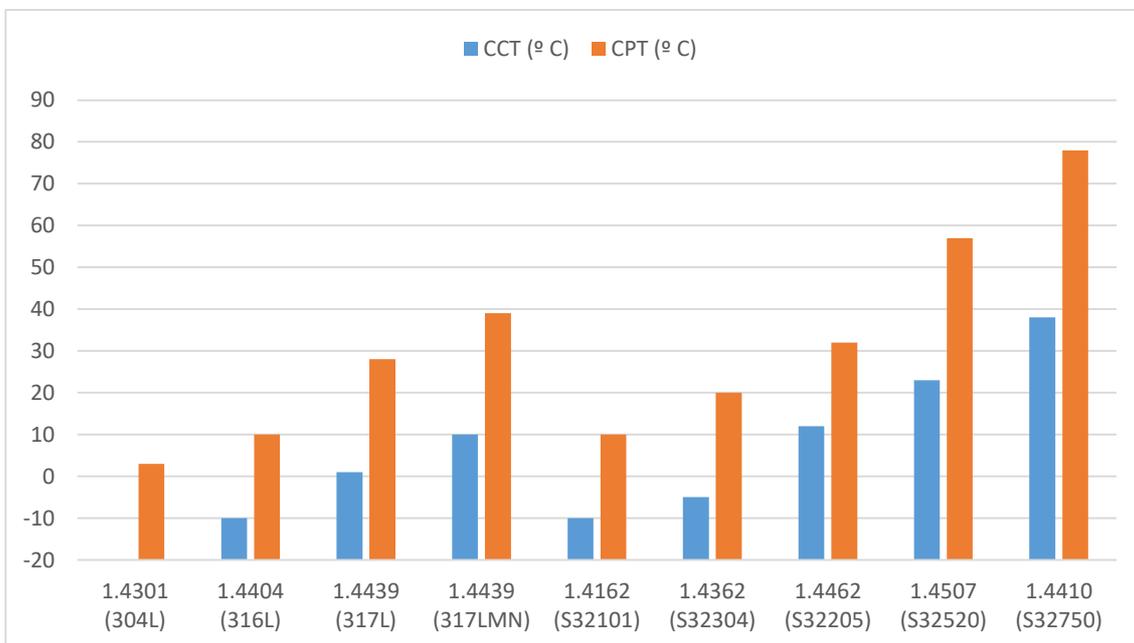


Figura 10. Valores de CCT y CPT de algunos aceros inoxidable. IMO A, 2012.

El alto contenido de cromo, molibdeno y nitrógeno de los tipos Dúplex proporciona muy buena resistencia a la corrosión localizada en ambientes acuosos. Dependiendo del contenido de aleantes, algunos tipos Dúplex están entre los aceros inoxidable de mejor

rendimiento.

En la figura 10 se compara la resistencia a la corrosión por picaduras e intersticial de diversos aceros inoxidable, conforme el procedimiento *ASTM G 48* (6% de cloruro férrico). Se puede observar que tanto la CPT como la CCT (ver apdo. 2.3.3) del Dúplex está por encima del ampliamente utilizado *AISI 316*, lo que lo convierte en un material muy versátil en aplicaciones con peligro de corrosión de aquel tipo, verbigracia, aplicaciones de agua marina no aireada.

Resistencia a la corrosión bajo tensión

Algunos de los primeros usos de los aceros inoxidable Dúplex se basaron en su resistencia a la corrosión bajo tensión. Comparados con los austeníticos con similar resistencia a la corrosión intersticial y por picaduras, los Dúplex presentan mejor resistencia a la tensocorrosión. En la industria química, los aceros Dúplex se han empleado en la sustitución de austeníticos con un riesgo importante de sufrir corrosión bajo tensión; sin embargo, al igual que con muchos materiales, los inoxidable pueden ser susceptibles al agrietamiento en dicho servicio, sobre todo si las condiciones favorecen el agrietamiento inducido por hidrogeno. A este respecto, la resistencia a la corrosión bajo tensiones inducida por hidrógeno es función del contenido de ferrita, 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 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 sulfuroso y salmuera.

2.5.3 Propiedades mecánicas

Los aceros inoxidable Dúplex tienen propiedades mecánicas excepcionales. En la tabla 7 podemos ver las de los aceros Dúplex convencionales; nótese que su límite elástico es más del doble del de los aceros austeníticos sin nitrógeno. Esto permite reducir los espesores de diseño en algunas aplicaciones. En la figura 11 se comparan los límites elásticos de varios aceros Dúplex con el austenítico *AISI 316L*.

Las propiedades de los Dúplex forjados son muy anisotrópicas, debido a los granos alargados y textura cristalográfica resultantes del laminado en caliente o en frío. Si bien la estructura de solidificación del Dúplex es isotrópica, tras el laminado o la forja se practica un recocido para la reformación del grano.

Tabla 7. Propiedades mecánicas de aceros Dúplex convencionales.

EN nº	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	Alargamiento (%)
1.4362	400	630	25
1.4462	460	640	25
1.4410	530	730	20

A pesar de su elevada resistencia, los aceros inoxidable Dúplex tienen buena ductilidad y tenacidad, aunque, en general, menores que las de los inoxidables austeníticos. Por tanto, podría ser necesario aumentar el radio de doblado para evitar el agrietamiento. En comparación con el acero al carbono o con los inoxidables ferríticos, la transición dúctil-frágil es más gradual, como los aceros austeníticos, lo que los hace ideales para trabajar a temperaturas criogénicas.

Si bien el límite elástico del inoxidable Dúplex puede permitir la reducción de espesor, también puede presentar dificultades durante la fabricación. Debido a su mayor resistencia, la deformación plástica requiere mayores fuerzas.

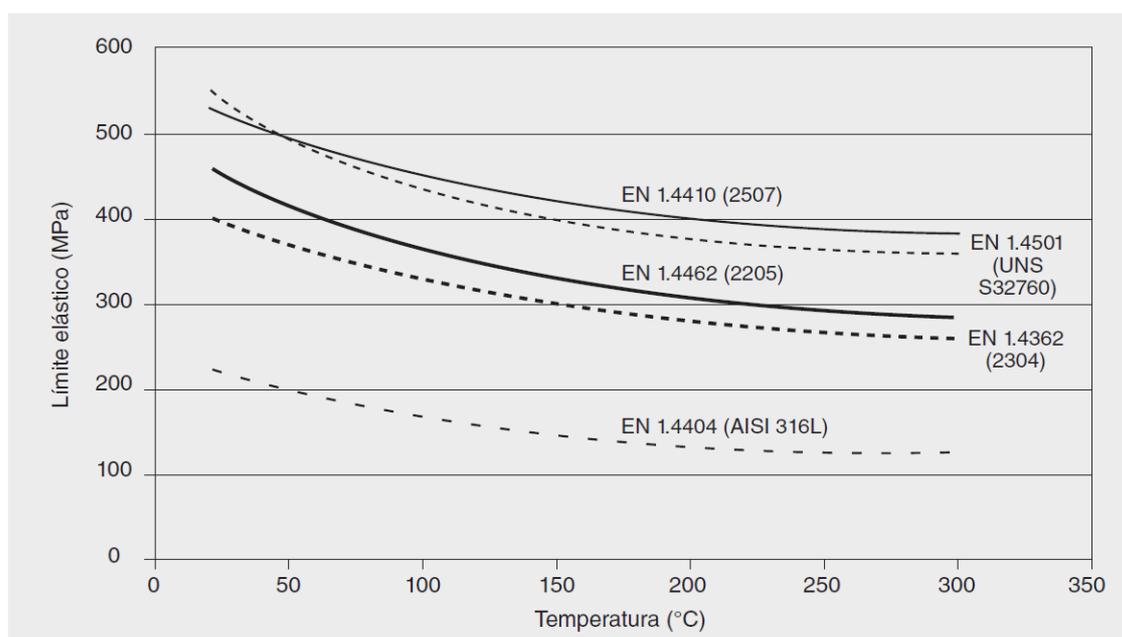


Figura 11. Comparación de límite elástico de aceros Dúplex, SuperDúplex y AISI 316L.

Debido a su mayor dureza y velocidad de endurecimiento por deformación, normalmente los Dúplex acortan la vida de las herramientas en las operaciones de mecanizado, o bien requieren mayor tiempo, 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 Dúplex, aun siendo buena, es aproximadamente la mitad que la de los austeníticos.

Soldadura

Los problemas en la soldadura de los aceros inoxidable 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 inoxidable austeníticos más comunes, estos problemas disminuyen ajustando la composición del metal de aporte para conseguir un contenido de ferrita significativo. Para los inoxidable 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 un gran número de pasadas para completar la soldadura.

Puesto que los inoxidable Dúplex tienen muy buena resistencia al agrietamiento en caliente debido al alto contenido de ferrita, este problema no suele tenerse en cuenta a la hora de soldar estos aceros. Los problemas más importantes con los Dúplex están relacionados con la **Zona Afectada Térmicamente (ZAT)** y su 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.

Selección del material

La respuesta de los inoxidable Dúplex a la soldadura puede modificarse sustancialmente por variaciones químicas o de procesado, sabiendo siempre de la importancia del nitrógeno en la composición del metal base. Si el material de partida se enfría lentamente al aire 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.

Limpieza previa a la soldadura

La medida de limpiar antes de soldar todas las zonas que vayan a calentarse es aplicable tanto a los Dúplex como al resto de inoxidable. 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.

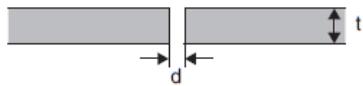
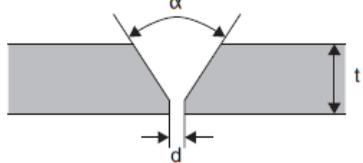
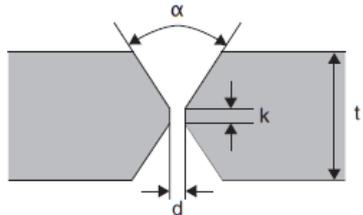
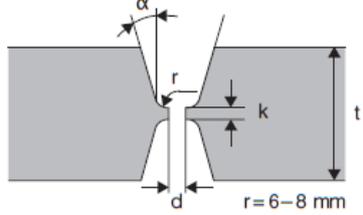
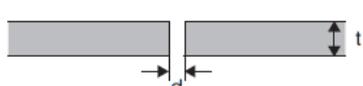
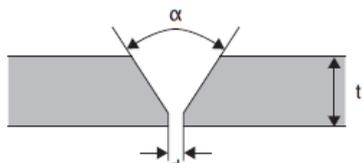
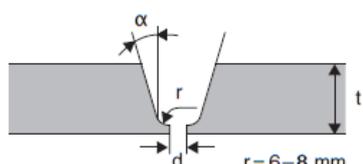
Diseño de junta	Proceso	Espesor t (mm)	Separación d (mm)	Raíz k (mm)	Bisel α (°)
	GTAW	3-5	1-3	-	-
	GMAW	3-6	1-3	-	-
	SMAW	3-4	1-3	-	-
	SMAW	4-15	1-3	1-2	55-65
	GTAW	3-8	1-3	1-2	60-70
	GMAW	5-12	1-3	1-2	60-70
	SAW	9-12	5	80	
	SMAW	>10	1,5-3	1-3	55-65
	GMAW	>10	1,5-3	1-3	60-70
	SAW	>10	0	3-5	90
	SMAW	>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 12. Diseños de unión recomendados para aceros Dúplex y SuperDúplex. IMOA.

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. Se recomienda mecanizar antes que esmerilar la preparación de bordes para proporcionar uniformidad a la separación entre piezas. Cuando es necesario esmerilar, debe prestarse atención a la uniformidad de la preparación y al ensamblado. Deben eliminarse todas las

rebabas de esmerilado para mantener la fusión y la penetración completas. Con un inoxidable austenítico, un soldador experto puede superar algunas deficiencias en la preparación de uniones manipulando el soplete; sin embargo, con el 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 12 se muestran algunos diseños de unión recomendados para los aceros inoxidables Dúplex, pero hay que destacar que otros tantos son válidos siempre que se asegure la penetración total y se minimice el riesgo de perforación.

Pre calentamiento

Como norma general, no se recomienda precalentar ya que 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, siempre y cuando se haga a unos 100° C de forma uniforme y solo después de que se hayan limpiado las piezas.

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 austeníticos, y su mayor conductividad térmica y menor coeficiente de dilatación ayudan a que no se presente la misma alta intensidad de tensiones térmicas locales en las soldaduras que los 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 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 posterior enfriamiento rápido de esta zona, estableciendo, por regla general, la temperatura máxima entre pasadas en 150° C para los Dúplex de baja aleación y convencionales y en 100° C para los SuperDúplex.

Tratamiento térmico posterior

El alivio de tensiones posterior a la soldadura no es necesario con los Dúplex e incluso puede resultar perjudicial, ya que el tratamiento térmico puede precipitar fases intermetálicas o agrietamiento, con pérdida de tenacidad y de resistencia a la corrosión cuando la temperatura supera los 315° C.

No obstante, cualquier tratamiento térmico posterior a la soldadura debería incluir el

recocido de solubilización completo seguido de un temple con agua y ha de considerarse obligatoriamente en el 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.

2.5.4 Cualificación del procedimiento de soldadura

Con los aceros inoxidable austeníticos convencionales, los ensayos de cualificación habituales para los procedimientos de soldadura son bastante simples; sin embargo, no son lo suficientemente exhaustivos para detectar problemas clásicos de los aceros Dúplex, como la formación de fases intermetálicas o el exceso de ferrita. 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, prácticamente inviables. Por ello, los procedimientos se cualifican por rangos establecidos por normativa (ya sea ISO o las Reglas de las Sociedades de Clasificación, que veremos más adelante) en las condiciones más rigurosas para los aceros inoxidable dúplex. De hecho, cabe destacar que las Reglas de Clasificación de Bureau Veritas reservan un apartado específico para ensayos de procedimientos de soldadura de aceros Dúplex.

2.5.5 Procesos de soldeo

Los aceros inoxidable Dúplex han experimentado un importante desarrollo comercial en las últimas décadas. Con un limitado conocimiento del papel que juega el nitrógeno en el control de la estabilidad de fases, la preocupación inicial de la soldadura era la limitación del aporte de calor. Tal restricción provocó que muchos de los procesos de soldadura más rentables, con altas velocidades de deposición como el arco sumergido (SAW) se consideraran inapropiados para los Dúplex. De todos modos, la necesidad llevó a investigar para poder emplear los procesos más rentables y, a día de hoy, prácticamente la totalidad de los procesos de soldeo son aplicables a los aceros inoxidable Dúplex.

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 conocida como 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 proceso el principal del procedimiento, normalmente resulta adecuado cualificar procedimientos TIG para reparaciones o acabados locales.

Equipo

La mejor manera de realizar soldaduras TIG es con corriente continua con polaridad directa, electrodo negativo (CCPD, E-); el uso de polaridad inversa provocaría el deterioro del electrodo.

El electrodo debería ser de wolframio toriado al 2% (especificación AWS 5.12). Para facilitar el control del arco, la punta del electrodo se rectifica de forma cónica con ángulo de 30 a 60° y una pequeña parte plana en el extremo.

Metales de aporte

La mayoría de los metales de aporte para la soldadura de los dúplex se describen como coincidentes, aunque normalmente están sobrealeados con níquel en comparación con los productos transformados con los que supuestamente deberían coincidir; el contenido de níquel suele ser del 2 al 4% más alto que en el producto transformado. El contenido de nitrógeno normalmente es ligeramente inferior al del metal base. Los aportes coincidentes ofrecen resultados aceptables cuando se unen Dúplex a aceros inoxidable austeníticos o aceros al carbono.

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, con pureza superior al 99,95%. 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 de 12 a 18 l/min cuando se utiliza una pantalla difusora, y la mitad si se emplea una tobera de gas normal.

Los caudales de gas de respaldo, también recomendado el 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 superficie del volumen cerrado, con una purga mínima de siete veces el volumen.

Deben evitarse las adiciones de oxígeno y 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 ni en el de respaldo por la posibilidad de fragilidad o agrietamiento de la ferrita.

Técnicas 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 Dúplex se corre el riesgo de aumentar el tiempo de exposición a temperatura cuando se utilizan tales técnicas.

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 sería interrumpir la soldadura y eliminar por esmerilado 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 constantes 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 para los Dúplex y por debajo de 100° C para los SuperDúplex con el fin de permitir el enfriamiento adecuado de la ZAT en las siguientes pasadas.

En la soldadura TIG el metal de aporte más utilizado para unir inoxidables Dúplex es el de aporte coincidente, ligeramente sobrealeado con níquel. Los metales de aportes coincidentes también se han utilizado con éxito en la soldadura de SuperDúplex EN 1.4462.

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 y 2,5 kJ/mm, calculado con la fórmula típica:

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

$$\text{donde } \begin{cases} V: \text{tensión (V)} \\ A: \text{intensidad (A)} \\ S: \text{velocidad (mm/s)} \end{cases}$$

A este respecto, son los propios proveedores quienes lanzan una serie de

recomendaciones, en nuestro caso, disponemos de las siguientes:

- EN 1.4362 (2304) (Dúplex): 0,5 ÷ 2,0 kJ/mm
- EN 1.4462 (2205) (Dúplex): 0,5 ÷ 2,5 kJ/mm
- EN 1.4410 (2507) (SuperDúplex): 0,3 ÷ 1,5 kJ/mm

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. Esta soldadura se utiliza con frecuencia para suplementar y acabar construcciones de gran tamaño ensambladas mediante otros procesos de soldadura. En construcciones soldadas de tubería, es frecuente su uso en las pasadas de raíz, ya que se consigue una penetración bastante limpia, sin descuelgues de material que puedan obstruir el paso del fluido. Además, es el proceso que conlleva menor aporte térmico.

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

La soldadura por arco con gas (GMAW), denominada 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. Suele emplearse para cordones largos, suplementándose con el TIG.

Equipo

La soldadura GMAW requiere una fuente de tensión constante con corriente de arco pulsada. Se ha de efectuar con corriente continua de polaridad inversa, electrodo positivo (CCPI, E+) en alguno de los tres modos de transferencia de arco que existen:

Transferencia por cortocircuito. Este modo es útil para materiales de hasta 3 mm de espesor ya que es el de aporte térmico más bajo y, por ende, se reduce el riesgo de perforación y deformación por calor.

Transferencia por arco pulsado. Este modo requiere dos fuentes de alimentación conmutadas para generar el pulso. Proporciona altas velocidades de deposición de metal.

Transferencia por rociado (spray). Este modo es el de mayor aporte térmico, pero también el que ofrece la velocidad de deposición más alta. Es ideal para soldadura en posición de cordones largos y rectos.

Metales de aporte

El proceso GMAW utiliza un electrodo consumible en forma de alambre continuo que se alimenta a través de una pistola mediante un sistema semiautomático (de ahí su nombre coloquial: "semi") o automático. Los metales de aporte, como en el TIG, suelen ser de

composición coincidente, sobrealeadas con níquel para conseguir el equilibrio en la soldadura.

Protección

La selección del gas de protección del MIG es algo más compleja que el TIG. El rango de los gases de protección oscila entre el argón puro y mezclas de argón, alrededor del 80%, con helio, nitrógeno y oxígeno en cantidades seleccionadas para optimizar la soldabilidad. Los caudales recomendados se sitúan en el rango de los 12÷16 l/min, aunque dependen del modo de transferencia, velocidad de soldeo y diámetro del alambre.

Técnica y parámetros

Tabla 8. Parámetros de soldeo para distintos métodos de transferencia GMAW

	Diámetro del alambre (mm)	Intensidad (A)	Voltaje (V)
Transferencia por cortocircuito	1	90 – 120	19 – 21
	1,2	110 – 140	20 – 22
Transferencia por rociado	1	170 – 200	25 – 28
	1,2	210 – 280	26 - 29

Los parámetros de soldadura típicos para la transferencia globular y por rociado se resumen en la tabla 8.

Como la soldadura TIG, el proceso MIG requiere una buena y consistente preparación de bordes, alineación y separación de raíz.

Soldadura por arco con alambre tubular (FCAW)

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 FCAW, 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 FCAW 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 FCAW se sobrealea 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 FCAW de diferentes proveedores. Es importante que la soldadura de producción por FCAW utilice alambre precedente de la misma fuente que utilizó en la cualificación de procedimiento para evitar diferencias.

Protección

El gas de protección más utilizado en FCAW es de composición 80% argón y 20% CO₂. El caudal recomendado por suministradores de consumibles de soldadura (Avesta, ESAB, etc.) es de 20 – 25 l/min. El control de la prolongación del alambre es importante para la limitar la absorción de carbono.

Técnica y parámetros

Para el alambre de diámetro 1,2 mm los ajustes de corriente y de voltaje recomendados son los que figuran en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de soldeo del proceso FCAW para distintas posiciones.

Posición de soldeo	Intensidad (A)	Voltaje (V)
Horizontal	150 – 200	22 – 38
Vertical	60 – 110	20 – 24

Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)

La soldadura por arco con electrodo revestido es un proceso de soldadura muy versátil para geometrías 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, electrodo positivo (CCPI, E+).

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 de soldeo específica.

Los revestimientos de los electrodos SMAW son higroscópicos y la presencia de agua degradará sustancialmente su rendimiento. El fundente aumenta el contenido en oxígeno de la soldadura, lo que se traduce en una reducción de la tenacidad, situándose muy por debajo de la del metal base y, aun así, por encima de los valores considerados óptimos para aceros al carbono y aleados.

Protección

La protección no es un aspecto a tener en cuenta con este proceso de soldeo, ya que se basa en el fundente y gases de protección generados por el revestimiento de los electrodos. Sin embargo, se recomiendan ciertas técnicas de soldeo para optimizarla, tales como mantener el arco corto, para evitar porosidades u oxidación y no aumentar el aporte térmico

Técnica y parámetros

Los parámetros de soldadura SMAW dependen del diámetro del electrodo, como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Parámetros comunes de soldeo SMAW para distintos diámetros de varilla.

Diámetro de la varilla (mm)	Intensidad (A)	Voltaje (V)
2	35 – 60	22 – 28
2,5	60 – 80	22 – 28
3,25	80 – 120	22 – 28
4	100 – 160	22 – 28

Soldadura por arco sumergido (SAW)

La soldadura por arco sumergido permite la deposición de grandes cantidades de metal, reduciendo el tiempo de exposición de exposición de la ZAT a temperaturas críticas. Los Dúplex pueden soldarse por arco sumergido con un riesgo mínimo de agrietamiento en caliente. La soldadura SAW resulta rentable y técnicamente satisfactoria para grandes construcciones y cordones rectos de longitud considerable, como, por ejemplo, para tubos con soldadura de altos espesores

Materiales de aporte y protección

Para la soldadura SAW, como para las mencionadas anteriormente, el metal de aporte

Dúplex coincidente resulta el más apropiado.

Técnica y parámetros

Los parámetros típicos para la soldadura por arco sumergido, SAW, de aceros inoxidable dúplex se resumen en la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros típicos para arco sumergido en función del diámetro de la varilla.

Diámetro de la varilla (mm)	Intensidad (A)	Voltaje (V)
2,5	250 – 450	28 – 32
3,25	300 – 500	29 – 34
4	400 – 600	30 – 35
5	500 – 700	30 – 35

3 FUNDAMENTOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

3.1 SOLDADURA TIG

El procedimiento de soldeo por arco bajo gas protector con electrodo no consumible, también llamado TIG (Tungsten Inert Gas), utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible y la pieza que se pretende soldar, mientras un gas inerte protege al baño de fusión. El material de aportación, cuando se utiliza, se aplica de manera manual o automatizada por medio de varillas. Figura 13.

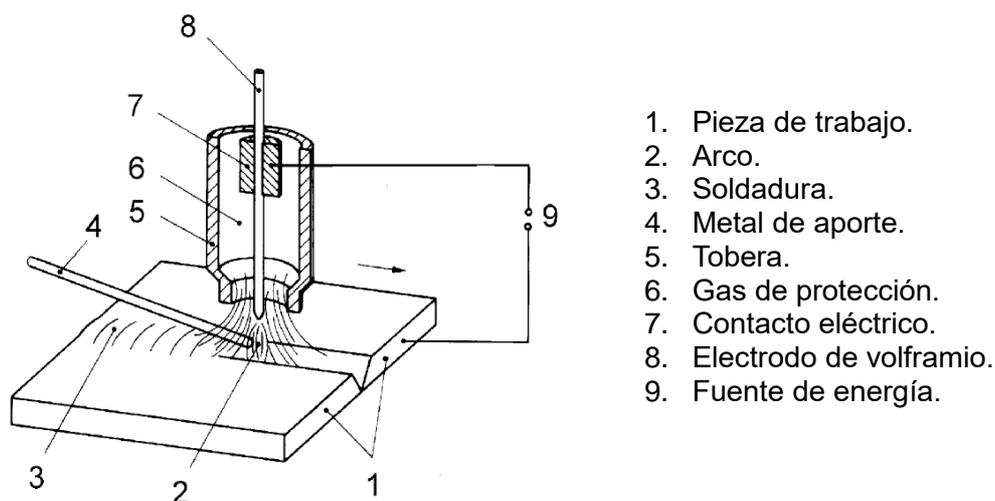


Figura 13. Soldeo con protección gaseosa y electrodo no consumible de tungsteno.

El proceso TIG también recibe la denominación GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).

De acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 4063:2009**, el proceso TIG engloba diferentes procesos tales como:

- 14: Soldeo con protección gaseosa y electrodo no consumible de tungsteno.
- 141: Soldeo por arco con gas inerte y electrodo consumible macizo; soldeo TIG.
- 142: Soldeo TIG autógeno.
- 143: Soldeo por arco con gas inerte y alambre tubular consumible; soldeo TIG.
- 145: Soldeo por arco con gas reductor y electrodo consumible macizo; soldeo TIG.
- 146: Soldeo por arco con gas reductor y alambre tubular consumible; soldeo TIG.
- 147: Soldeo con protección gaseosa y electrodo no consumible de tungsteno y gas activo; soldeo TAG.

3.1.1 Ventajas y limitaciones

Tabla 12. Ventajas y limitaciones del proceso GTAW.

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Resulta adecuado para unir la mayoría de metales. • Cuenta con un arco estable y concentrado. • No produce proyecciones, al no existir transporte de metal en el arco. • No genera escoria. • Produce cordones lisos, regulares y de gran calidad. • Se puede llevar a cabo con o sin metal de aporte. • Permite alcanzar velocidades de soldeo altas en espesores menores de 4 mm. • Permite un buen control de la penetración de raíz. • No requiere fuentes de energía excesivamente caras. • Permite el control independiente de la fuente de energía y del material de aporte. • No produce humos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con una tasa de deposición menor que la correspondiente a otros procesos. • Exige gran habilidad por parte del soldador en su aplicación manual. • No resulta económico para espesores mayores de 10 mm. • Presenta defectos de protección en presencia de corrientes de aire u otras inclemencias.

En la tabla 12 se recogen algunas de las ventajas y limitaciones que presenta este proceso de soldeo.

3.1.2 Características del proceso

El proceso TIG se puede utilizar para el soldeo de todos los materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, el circonio y sus aleaciones.

Puesto que el proceso posee las virtudes necesarias para conseguir soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y buen acabado superficial, es ideal para soldaduras de responsabilidad en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimentación, generación de energía, nuclear y aeroespacial.

Al contar con una baja tasa de deposición, no resulta económico para soldar materiales con espesores mayores de 6+8 mm; en cuyo caso se emplea más bien para efectuar la pasada de raíz, empleándose otros procesos más productivos y rentables para el relleno y el peinado.

3.1.3 Parámetros de soldeo principales

En el proceso TIG cabe destacar ciertos parámetros propios que influyen en el desarrollo y acabado del producto soldado final.

Diámetro del electrodo

El diámetro del electrodo determina la intensidad de soldeo. Así pues, una intensidad baja puede conducir a la inestabilidad del arco mientras que una alta intensidad ocasionará

erosión e inclusiones de wolframio en el metal soldado por la fusión del electrodo.

Corriente y polaridad

El tipo de corriente y polaridad influyen en otros parámetros del procedimiento.

- Cuando el electrodo está conectado al polo negativo, hablamos de polaridad directa o electrodo negativo (CCPD o CCEN).
- Cuando el electrodo está conectado al polo positivo, hablamos de polaridad inversa o electrodo positivo (CCPI o CCEP).

Con corriente continua, polaridad directa los electrodos tienen su máxima capacidad de conducción de corriente; con corriente continua, polaridad inversa sólo se puede alcanzar el 10% de la capacidad del caso anterior; empleando corriente alterna se obtienen capacidades en torno al 50%.

El proceso TIG puede utilizarse tanto en corriente continua como en corriente alterna; la elección de la clase de corriente y polaridad se realiza en función del material que se desea soldar.

Cuando se utiliza la corriente continua con polaridad directa la energía del arco se concentra fundamentalmente en la pieza, por lo que se obtiene un rendimiento térmico relativamente aceptable – 70% en la pieza, 30% en la punta del electrodo –, una velocidad de soldeo rápida y una penetración profunda y estrecha, aunque requiere una preparación de afilado del electrodo.

Invirtiendo la polaridad el reparto térmico es menos favorable (al contrario que en el caso anterior, 30% en la pieza y 70% en el electrodo). Esto se refleja en un sobrecalentamiento y rápido deterioro del electrodo, incluso a bajas intensidades. Además, la penetración es más bien escasa y la zona de baño relativamente ancha.

De acuerdo con lo anterior, cuando se trabaja con corriente continua se recomienda la polaridad directa; no obstante, resulta impracticable con aleaciones ligeras de Al y Mg, donde se forma una capa de óxidos refractarios recubriendo el baño de soldadura.

La corriente alterna aún, aunque reducidas, las ventajas de las dos polaridades: el buen comportamiento durante el semiciclo de polaridad directa y el efecto decapante del baño durante el semiciclo de polaridad inversa, por lo que suele emplearse en el soldeo de aleaciones ligeras, tales como las de aluminio y magnesio. Sin embargo, presenta dificultades en el cebado y estabilidad del arco. Se debe tener en cuenta que, en corriente alterna, el arco se apaga cada vez que el voltaje es nulo, dos veces cada ciclo.

En cuanto a la intensidad de soldeo, ha de tenerse en cuenta lo comentado

anteriormente. Conectando el electrodo al polo negativo, conseguimos un reparto térmico inclinado hacia la pieza soldada, lo que nos permite soldar con mayor intensidad ya que la temperatura alcanzada en el electrodo es menor que la de fusión del wolframio. Por ejemplo, para un electrodo de $\varnothing 2,5\text{mm}$ se puede soldar con 200 amperios con polaridad directa; sin embargo, con polaridad inversa un electrodo de tungsteno de $\varnothing 6\text{ mm}$ no puede emplearse con más de 120 amperios.

3.1.4 Electrodo

La función del electrodo en este proceso es únicamente la de mantener el arco sin aportar material al baño de fusión. Por este motivo y para evitar su desgaste, es muy importante que posea una alta temperatura de fusión.

Los electrodos están hechos de tungsteno puro o con aditivos. Conforme se fue avanzando en este proceso, se pudo comprobar que al añadir óxidos de torio o circonio se aumentaba la emisividad del electrodo, incrementándose el flujo de electrones lo que se traduce en una mejora de la estabilidad del arco. Por otra parte, dichos óxidos permiten utilizar mayores intensidades de corriente ya que aumentan el punto de fusión del electrodo. De esta forma se previene el desgaste del electrodo y la consecuente contaminación del baño de fusión.

En la actualidad son tres los tipos de electrodos más comunes, a saber, de tungsteno puro, con óxidos de torio y con óxidos de circonio.

Tungsteno puro

Dichos electrodos están compuestos por tungsteno puro, cuyo punto de fusión ronda los 3.400°C . El uso de estos electrodos requiere una preparación previa de su extremo, que ha de ser redondeado.

Se emplean fundamentalmente con corriente alterna en el soldeo de aluminio y sus aleaciones, ya que su forma redondeada es óptima para la estabilidad del arco utilizando aquel tipo de corriente. En corriente continua presentan problemas para el cebado del arco.

Tungsteno aleado con torio

La presencia de óxidos de torio en estos electrodos aumenta su temperatura de fusión hasta los 4.000°C aproximadamente. Como en el caso anterior, también requieren preparación previa: su extremo debe estar afilado.

Son los más empleados en el soldeo con corriente continua de aceros al carbono, baja aleación, inoxidable, cobres, titanio, etc. En corriente alterna no se suelen utilizar.

El contenido de torio conlleva, como se ha mencionado antes, una mayor emisividad,

lo que mejora el cebado del arco, confiere mayor resistencia a la contaminación y proporciona mayor estabilidad al arco. Electrodo de tungsteno con óxidos de cerio o lantano se pueden emplear en los mismos casos que los electrodos con torio, con la ventaja de que esos elementos no son radiactivos, a diferencia de este.

Su precio suele ser entre un 10 y un 15% mayor que el de los de tungsteno puro.

Tungsteno aleado con circonio

Los electrodos de tungsteno con circonio tienen un punto de fusión de 3.800° C aproximadamente. Requieren la misma preparación que los de tungsteno puro.

Los electrodos con óxidos de circonio presentan unas características intermedias entre los electrodos de tungsteno puro y los de tungsteno con torio. Se emplean con corriente alterna y continua, siendo más usuales en el primer caso ya que combinan las características de estabilidad del arco y punta adecuada típicas de los electrodos de tungsteno puro con la facilidad de cebado y la resistencia a mayores intensidades de corriente de los electrodos aleados con torio. Se emplean en el soldeo de materiales ligeros como aluminio y magnesio y en casos en que se desee gran calidad frente a un ensayo radiográfico, ya que se minimiza el riesgo de inclusiones de wolframio.

Los diámetros normalizados para el electrodo son 1,0; 1,6; 2,0; 2,4; 3,0; 3,2; 4,0; 4,8; 5,0 y 6,4 y la longitud estándar de 150 mm.

3.1.5 Varillas de material de aporte

En el proceso de soldadura TIG, cuando es necesario, el material de aporte viene comúnmente en forma de varillas de longitud estándar de un metro y diámetros normalizados de 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0 y 5,0 mm y se alimenta de manera manual o automática.

La consecución de una soldadura libre de escorias y defectos pasa por el empleo de un material de aportación coincidente, es decir, con la misma o similar composición química que el material base. Además, ha de mantenerse libre de contaminaciones ambientales como humedad, polvo o suciedad y, durante el proceso de soldeo, la parte caliente de la varilla ha de estar recubierta por el gas de protección que, al ser inerte, no permite reacciones en el baño de fusión.

3.1.6 Gases de protección

El soldeo TIG se realiza siempre en una atmósfera de gas inerte que protege el baño de fusión. Para el soldeo, se emplean comúnmente los siguientes gases nobles:

Argón

Es un gas noble no tóxico, sin color ni olor.

Es tremendamente eficiente debido a su alta densidad. Al ser 1,4 veces más pesado que el aire, realiza perfectamente su función de desalojar el aire de la zona de soldadura con caudales moderados. Permite un fácil cebado y una buena estabilidad del arco gracias a una baja energía de ionización, que además lo convierte en el gas idóneo para el soldeo de piezas de pequeño espesor, donde se emplean bajos voltajes y, por ende, bajos aportes de calor. Por último, resulta bastante económico.

Helio

El helio presenta propiedades opuestas al argón, tales como baja densidad, lo que requiere unos caudales mayores – de 2 a 2,5 veces mayor que los caudales de argón – y a priori, lo convierte en económicamente menos rentable. Una alta energía de ionización y conductividad se traduce en la obtención de cordones anchos con gran penetración y un aporte térmico elevado, por lo que está indicado para el soldeo automático de piezas de gran espesor o para la unión de materiales de gran conductividad, como el cobre; sin embargo, el elevado potencial de ionización no facilita la estabilidad del arco.

Mezclas He/Ar

La mezcla de ambos gases ofrece prestaciones complementarias en función de la proporción.

Adiciones de hidrógeno

La incorporación del hidrógeno al argón para la protección se refleja en las siguientes ventajas:

- Aumenta el aporte térmico.
- Permite aumentar la velocidad de soldeo.
- Aumenta la anchura y penetración del cordón de soldadura.

Se debe tener en cuenta que no se debe utilizar hidrógeno para el soldeo de aceros al carbono, de baja aleación ni inoxidables ferríticos, ya que puede producir fisuración.

Adiciones de nitrógeno

La adición de nitrógeno no se popularizó hasta el aumento en el uso de aceros inoxidables austenítico-ferríticos. En el soldeo de estos aceros, el nitrógeno – en cantidades del 1 al 3% – se emplea para estabilizar la austenita. Las ventajas que presenta son las siguientes:

- Aumenta la penetración y la anchura del cordón.
- Aumenta el aporte térmico.

- Tiene un coste reducido.

3.1.7 Gas de respaldo

En determinadas circunstancias es necesario utilizar un gas de respaldo para la pasada de raíz, verbigracia, la soldadura de tuberías o tanques de acero inoxidable.

Con dicho fin, se emplea la misma variedad de gases que para el gas de protección.

3.2 SOLDADURA GMAW

La soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding), también conocida como MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) es un proceso de soldeo donde el calor necesario para la unión es producido por un arco eléctrico entre un electrodo continuo consumible y la pieza que se suelda. La protección del arco eléctrico y del baño de fusión se obtiene mediante un gas o una mezcla.

El electrodo es un alambre solido desnudo que se alimenta de forma continua automáticamente y se convierte en el metal depositado según se consume. El electrodo, arco, metal fundido y zonas adyacentes del metal base quedan protegidas de la contaminación de los gases atmosféricos mediante un flujo de gas que se aporta por la boquilla de la pistola.

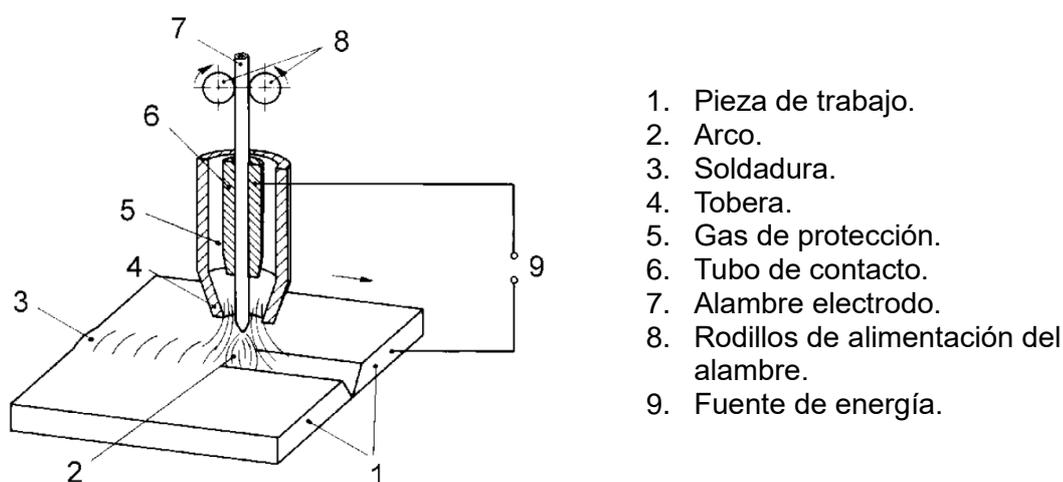


Figura 14. Soldeo por arco protegido por gas y electrodo de aporte.

El inicio del proceso GMAW data de 1920 pero su desarrollo comercial no llegó hasta mediados del siglo XX, cuando se consideraba un proceso de alta intensidad de corriente, pequeño diámetro del metal de aporte y utilización de gas inerte como protección. Desde entonces, se han realizado diversos avances asociados con la aplicación del proceso. Por una parte, para la soldadura de aceros se incorporó CO_2 en lugar de un gas inerte; posteriormente se incorporaron al catálogo otros gases como helio y mezclas Ar-CO_2 , Ar-O_2 , etc. Por otra parte, se desarrollaron diversas formas de transferencia de arco, lo que permitió

operar con menores densidades de corriente.

El proceso GMAW puede trabajar en modo semiautomático o automático, siendo fácilmente adaptable para su utilización con robot. Eligiendo el consumible y gas de protección adecuados, este proceso es válido para la unión de todos los metales y aleaciones utilizados comercialmente.

De acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 4063:2009**, el proceso MIG engloba diferentes procesos tales como:

- 13: Soldeo por arco protegido con gas y electrodo de aporte.
- 131: Soldeo por arco con alambre electrodo macizo y gas inerte; soldeo MIG.
- 132: Soldeo por arco con alambre tubular relleno de fundente y gas inerte; soldeo MIG.
- 133: Soldeo por arco con alambre tubular relleno de polvo metálico y gas inerte; soldeo MIG.
- 135: Soldeo por arco con alambre electrodo macizo y gas activo; soldeo MAG.
- 136: Soldeo por arco con alambre tubular relleno de fundente y protección de gas activo; soldeo MAG.
- 138: Soldeo por arco con alambre tubular relleno de polvo metálico y protección de gas activo; soldeo MAG.

3.2.1 Ventajas y limitaciones

En la tabla 13 se recogen algunas de las ventajas y limitaciones que presenta este proceso de soldeo.

Tabla 13. Ventajas y limitaciones del proceso GMAW.

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Puede emplearse en la soldadura de todos los metales y aleaciones que se utilizan comercialmente. • Permite la soldadura en todas las posiciones, no como en el caso de, por ejemplo, el arco sumergido. • Presenta alta tasa de deposición. • Permite realizar soldaduras de gran longitud sin interrupciones. • Requiere poca limpieza posterior, ya que apenas genera escoria. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un equipo de soldeo más complejo. • Presenta dificultades en la realización de uniones de difícil acceso; la pistola debe situarse no más lejos de 20 mm para asegurar la protección del gas. • No está indicado para la soldadura a la intemperie sin protección del viento o las corrientes de aire.

3.2.2 Tipos de transferencia

En el proceso GMAW, la transferencia del metal desde el electrodo hasta la pieza

puede realizarse básicamente de dos formas: desprendiéndose gotas del electrodo y moverse a través del arco hasta llegar a la pieza o mediante contacto entre el electrodo con el metal fundido depositado por soldadura.

Los tipos de transferencia más empleados son los siguientes:

- Arco corto o cortocircuito
- Arco largo o rociado o spray
- Globular
- Arco pulsado

Arco corto o cortocircuito

Es una variación del proceso en la que el electrodo se deposita durante los sucesivos cortocircuitos. La transferencia de metal tiene lugar cuando el electrodo entra en contacto con el metal base. En este tipo de transferencia, la relación entre la velocidad de fusión del electrodo y su velocidad de alimentación dentro de la zona de soldadura hace que se alterne de modo intermitente el arco eléctrico y el cortocircuito entre el electrodo y el metal base.

Cuando el alambre toca el metal base se produce el cortocircuito y durante este tiempo no hay arco. La intensidad comienza a fluir a través del alambre y a elevarse, produciendo el calentamiento del alambre hasta un estado plástico. En este momento el alambre comienza a estrangularse por la fuerza electromagnética, formándose la gota que se transfiere al baño de fusión, estableciéndose de nuevo el arco.

La transferencia por arco corto se obtiene con bajos niveles de intensidad. La transferencia se produce únicamente durante el periodo en que están en contacto la pieza y el metal, algo que ocurre entre 60 y 150 veces por segundo.

Este modo de transferencia se emplea en un gran número de aplicaciones y está indicado para la soldadura de espesores delgados, dado que su aporte térmico es bajo, y para puntear preparaciones, en todas las posiciones.

En la soldadura de espesores gruesos apenas se emplea este tipo de transferencia por la dificultad que entraña la selección de los parámetros y la técnica empleada para asegurar la fusión requerida.

En resumen, las características que presenta la transferencia por cortocircuito son las siguientes:

- Bajos voltajes e intensidades.
- Pequeños diámetros de alambre.

- Bajo aporte térmico.
- Pequeño baño de fusión.
- Recomendado para la soldadura de espesores delgados y amplias separaciones de raíz.
- Adecuado para soldar en todas las posiciones.
- Bajos valores de deposición de alambre.

Los gases y mezclas con los que se puede soldar con arco corto van desde el argón con bajo contenido en CO₂ hasta el dióxido de carbono puro. Para bajas intensidades, el CO₂ es buena opción ya que el arco se calienta más que con una mezcla de argón y, a bajos niveles de intensidad, no hay muchas proyecciones. Sobre espesores delgados, los gases con más bajos contenidos de CO₂ trabajan mejor, disminuyendo la posibilidad de traspasar y permitiendo intensidades y velocidades de soldadura más elevadas. Para la soldadura de inoxidable se añade, a veces, helio para incrementar el aporte térmico a bajas velocidades de deposición.

Transferencia por arco largo o rociado (spray)

En la transferencia por arco largo, el extremo del alambre se afila, las gotas de metal fundido son menores o iguales que el diámetro de alambre y su transferencia se realiza desde el extremo del alambre al baño fundido a un ritmo de cientos de gotas por segundo.

Debido al afilado del extremo del alambre, la densidad de corriente es muy elevada. Esto hace que las gotas sean más pequeñas que el diámetro del alambre. Las gotas son aceleradas por el campo magnético en vez de transferirse por gravedad y son absorbidas dentro del baño de fusión en vez de salpicar.

La transferencia por arco largo presenta ventajas reales en la unión de espesores gruesos y posición horizontal y en cornisa. Todos los aceros y la mayoría del resto de aleaciones pueden soldarse con arco largo.

En resumen, la transferencia por arco largo o rociado o spray presenta las siguientes características:

- Elevado aporte térmico.
- Grandes baños de fusión.
- Buen resultado en soldadura de espesores gruesos.
- Adecuado para soldadura en posición horizontal.
- Alta distorsión.

- Baja cantidad de salpicaduras.
- Altos valores de deposición de material de aporte.

Los gases empleados para arco largo tienen un contenido inferior de gases activos que los empleados para arco corto. La mayoría contienen 85÷90% de argón, siendo normalmente el resto de los componentes CO₂ y O₂ y, en algunas ocasiones, pueden contener pequeñas cantidades de helio para incrementar la energía del arco.

La transferencia por arco largo es un proceso limpio y de elevada eficiencia. Permite emplear todos los diámetros de alambre y un amplio rango de intensidades. Para la mayoría de aplicaciones resultan adecuados alambres desde 0,9 a 1,6 mm con intensidades entre los 175 y los 500 A. Con el equipo correctamente ajustado, apenas se producen salpicaduras y cerca del 98% del alambre se deposita en el baño de fusión.

Transferencia por arco globular

La transferencia globular se caracteriza por la formación de una gota relativamente grande de metal fundido en el extremo del electrodo que se va sosteniendo gracias a la tensión superficial, como una burbuja. La gota cae por gravedad en el baño de fusión produciendo salpicaduras.

Este modo de transferencia tiene lugar cuando el ajuste de voltaje e intensidad excede a los del arco corto. Como este, puede obtenerse cuando se emplea CO₂ como gas de protección.

La transferencia globular no suele emplearse debido a la baja eficiencia del proceso. Es el tipo de transferencia que produce más salpicaduras o proyecciones, con hasta un 15% del alambre. Además, se obtienen bajas velocidades de soldadura y cordones de pequeño tamaño.

Arco pulsado

La transferencia por arco pulsado se realiza mediante arco largo, pero con la sutil diferencia de que se produce en pulsos a intervalos regularmente espaciados en lugar de suceder al azar.

En la figura 15 puede observarse un gráfico de onda cuadrada. La intensidad máxima se denomina *intensidad pico* y la mínima, *intensidad base*. Esta corriente, normalmente de 20÷40 A, sirve para mantener el arco y precalentar el electrodo que va avanzando continuamente. Cuando la intensidad se eleva al pico, se transfiere una gota en arco largo.

El resultado es producir una transferencia que combina el bajo aporte térmico asociado al cortocircuito con la limpieza – ausencia de proyecciones – y buena penetración

propia del rociado. Esto permite soldar pequeños espesores sin salpicaduras y en todas las posiciones.

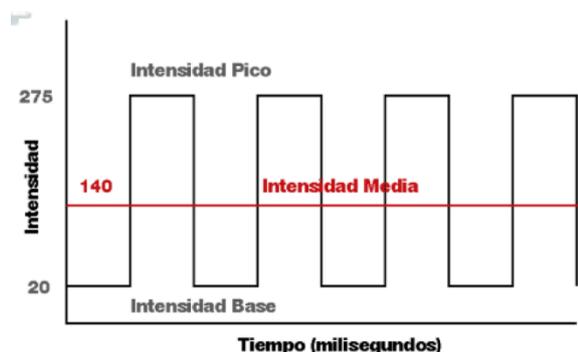


Figura 15. Onda eléctrica cuadrada para arco pulsado.

Al producirse una intensidad pico elevada, se pueden utilizar grandes diámetros con bajas velocidades de deposición, lo que permite solucionar problemas de alimentación relacionados con pequeños diámetros y también reducir costes.

3.2.3 Parámetros de soldeo principales

En el proceso GMAW influyen varias variables en la ejecución y resultado de la soldadura.

Corriente y polaridad

En cuanto a la intensidad de corriente, su incremento se ve reflejado en los siguientes aspectos de la unión:

- Un incremento en la profundidad y anchura de la penetración.
- Un incremento en la velocidad de deposición.
- Un incremento en la dimensión del cordón de soldadura.

La polaridad se define de la misma manera que en el caso de la soldadura TIG: pistola al polo negativo, polaridad directa (CCPD o CCEN); pistola al polo positivo, polaridad inversa (CCPI o CCEP).

En la mayoría de las aplicaciones MIG se emplea la polaridad inversa. Esta configuración permite, para un amplio rango de intensidades, obtener un arco estable, conseguir una transferencia de metal suave, no generar apenas proyecciones y obtener unos cordones con buenas características y con la penetración adecuada. Cabe destacar, pues, que se recomienda la polaridad contraria al proceso TIG.

Voltaje y longitud de arco

El voltaje y la longitud de arco están estrechamente relacionados; la longitud de arco

es directamente proporcional al voltaje.

Cuando se incrementa la longitud del arco, la superficie que cubre es mayor, produciendo una zona fundida más amplia, menos profunda y con un cordón más plano; justo al contrario de lo que ocurre con un arco más corto. Los voltajes demasiado altos, o sea, arcos muy largos, ocasionan mala protección e inestabilidad, dando origen a porosidad, proyecciones y mordeduras; los voltajes demasiado bajos, provocan zonas fundidas muy pequeñas, cordones estrechos y con sobrecordón.

Velocidad de soldeo

La velocidad lineal a la cual el arco se mueve a lo largo de la unión o velocidad de soldadura, afecta a la penetración de modo que, tanto para muy bajas como para muy altas velocidades, la penetración se reduce. A saber, cuando es baja, la cantidad de material y calor aportado aumentan y la penetración disminuye, ya que el arco incide sobre un baño fundido en lugar de hacerlo sobre el metal base. Cuando la velocidad es muy alta, disminuye el tamaño del cordón y la penetración por falta de material de relleno. Solo en valores intermedios de velocidad se consigue un aporte térmico, aporte de material y penetración idóneas.

Diámetro del electrodo

El diámetro del electrodo influye en su capacidad de respuesta a los cambios de longitud del arco. Cuanto menor sea, su fusión será más fácil, mejorando la capacidad de autorregulación y un arco más estable. Además, resulta conseguirse mayor profundidad de penetración ya que, al disminuir el diámetro, aumenta la densidad de corriente y disminuye la sección del arco, por lo que, a igual intensidad, habrá más concentración de calor con un electrodo más fino, resultando un cordón más estrecho y profundo.

Posición de soldeo

Por último, la posición de soldadura en función del método de transferencia influye de manera notable en el resultado de la unión.

La mayoría de las soldaduras con arco largo son hechas a tope en posición horizontal (1G o PA), mientras que para el resto de posiciones puede utilizarse el arco corto y el arco pulsado. Las soldaduras en ángulo realizadas con arco largo en posición plana (1F) tienen mejor aspecto, pies iguales y con menos tendencia a dejar mordeduras que las soldaduras realizadas en posición cornisa (4F o PD).

Para la soldadura vertical (3G, 3F o PG/PF) y bajo techo (4F, 4G o PE) se utiliza normalmente arco corto o pulsado y con los diámetros de alambre más pequeños. El bajo aporte térmico permite un enfriamiento rápido. Por la misma razón, la posición vertical

descendente (3G, 3F o PG) se recomienda para espesores delgados.

Cuando la soldadura se realiza en posición horizontal, la inclinación del eje de la soldadura respecto al plano horizontal tendrá influencia en el tipo de cordón, penetración y velocidad de soldadura. En la soldadura circunferencial en posición plana, donde la pieza a soldar gira debajo de la pistola, se posiciona la pistola dejando una inclinación respecto del centro.

En la soldadura en vertical descendente, el baño tiende a fluir hacia el alambre por acción de la gravedad y precalienta el metal base. Cuando el ángulo de inclinación se incrementa, la penetración disminuye y la anchura del cordón se incrementa. En posición vertical ascendente, también por acción de la gravedad, el baño fluye alejándose del electrodo. Los bordes de la soldadura pierden metal que se deposita en el centro. Cuando el ángulo de inclinación aumenta, ocurre el efecto contrario al de la descendente: la penetración aumenta y el cordón se estrecha.

3.2.4 Material de aporte

Como comentamos al principio de este apartado, en el proceso de soldadura GMAW el electrodo es consumible y forma el material de aporte. El material de aporte

El consumible ha de elegirse con la finalidad de obtener una unión con dos características básicas:

- Tener las propiedades mecánicas y físicas iguales o superiores a las de metal base.
- Obtener un metal soldado de calidad, sin defectos.

De acuerdo con lo anteriormente descrito, los alambres más empleados son de pequeños diámetros (0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 3,0 y 3,2 mm) y se suministran en bobinas o bidones preparados para instalar en los sistemas de alimentación del equipo de soldadura. Dados sus pequeños diámetros, la relación superficie/volumen es muy alta, por lo que pequeñas capas de polvo, suciedad o grasas pueden suponer una importante cantidad en relación con el volumen aportado, de aquí que sea de gran importancia mantener el alambre en un lugar limpio. Los alambres de acero al carbono y de baja aleación suelen disponer de un ligero recubrimiento de cobre que mejora el contacto eléctrico, la resistencia a la corrosión y disminuye el rozamiento con los distintos elementos del sistema de alimentación del equipo.

El material de aporte suele ser similar o idéntico en composición al metal base, produciendo una unión sin apenas cambios respecto al material original. No obstante, esto no siempre se cumple y, en ocasiones, se requiere cambios apreciables en la composición del alambre. Una de las modificaciones más frecuentes en el metal de aporte es la adición de

desoxidantes para evitar la porosidad o la pérdida de características mecánicas como consecuencia de la reacción del metal de soldadura con los gases de protección activos.

3.2.5 Gases de protección

La función principal del gas de protección es desplazar el aire de la zona de soldadura para proteger al metal fundido, el baño de fusión y el electrodo. No obstante, su influencia también abarca el tipo de transferencia de metal, la estabilidad del arco, la penetración y el tamaño del cordón, entre otros.

Para la elección del gas adecuado, se debe tener en cuenta que, si bien los gases inertes puros protegen al metal depositado de manera óptima, no siempre son los más adecuados. Mediante la mezcla de gases activos e inertes se obtienen simultáneamente protección adecuada y estabilidad en el arco y una transferencia de metal sin salpicaduras. Resulta común el empleo de argón, helio o una mezcla de ambos en la unión de metales no férricos y adiciones de oxígeno o dióxido de carbono puro en los férricos.

Como regla general, no es conveniente usar gases activos solos, a excepción del CO₂, perfectamente válido para la soldadura de gran variedad de aceros al carbono y de baja aleación. El resto de gases activos, salvo el nitrógeno, se añaden en pequeñas cantidades a los gases inertes. El N₂, por su parte, se emplea solo o con argón en la soldadura de cobre principalmente.

Argón, helio y sus mezclas

Aun siendo ambos inertes, las diferencias en sus propiedades se ven reflejadas en sus efectos sobre la transferencia de metal, penetración, tamaño del cordón y otras características.

El argón tiene alta capacidad de protección debido a su peso, mayor que el aire, lo que permite generar una atmósfera protectora con caudales moderados. Su potencial de ionización y conductividad, relativamente bajos, reducen el calor generado por el arco, o sea, el aporte térmico, haciéndolo ideal para soldar piezas de pequeño espesor o con baja conductividad. En tanto en cuanto a la forma de cordón, resulta estrecho y con mayor penetración en el centro.

En cuanto al helio, presenta características distintas. Con un peso menor que el del aire, es necesario más caudal para alcanzar el mismo nivel de protección. Por otra parte, su energía de ionización y conductividad son altas, generando un aporte térmico mayor, por lo que se recomienda su uso para la unión de piezas de gran espesor o gran conductividad, como el cobre. El resultado visual: un cordón ancho y con una penetración regular.

Huelga decir que, a efectos prácticos, se necesitan propiedades intermedias que se

consiguen con la mezcla de ambos.

Adiciones de oxígeno y dióxido de carbono. Transferencia con arco largo.

En la soldadura de aleaciones férreas, el uso de gases inertes puros no siempre proporciona las mejores características operacionales. La adición de oxígeno o dióxido de carbono al argón estabiliza el arco, mejora la transferencia del metal y, al mismo tiempo, cambian la forma de la sección de la soldadura, mejorando el mojado y el flujo del metal a lo largo de los bordes en aceros al carbono y de baja aleación, reduciendo las mordeduras. No obstante, dichas adiciones hacen que el gas de protección sea más oxidante, pudiendo provocar porosidad en la unión además de causar pérdidas en ciertos elementos como cromo, vanadio, aluminio, titanio, manganeso y silicio.

Adiciones de oxígeno y dióxido de carbono. Transferencia con arco corto

Los gases empleados en transferencia con arco corto son diferentes de los empleados para soldar con transferencia en arco largo. Para la soldadura de metales no féreos se emplea argón o la mezcla argón-helio en tanto que para la soldadura de aleaciones férreas se emplean siempre mezclas de gases inertes y activos, generalmente Ar-CO₂.

Los gases de protección que se emplean en este proceso sirven para aumentar el aporte térmico y mejorar el mojado. De todos modos, siempre el porcentaje de gas activo debe ser limitado para evitar reacciones perjudiciales entre el metal y el gas. Para ejemplificarlo, se debe tener en cuenta que, en la soldadura de aceros inoxidable, una presencia excesiva de CO₂ en el gas puede causar el aumento de carbono en la unión, lo que reduce su resistencia a la corrosión.

Dióxido de carbono

El dióxido de carbono ha sido uno de los gases más empleados en la soldadura de los aceros, debido a sus buenas características en velocidad de soldadura, penetración y formación de depósitos sanos y con buenas propiedades mecánicas, además de su bajo coste.

El CO₂ es oxidante a las temperaturas del arco, por lo que, para obtener soldaduras de calidad, el electrodo debe estar diseñado adecuadamente para su uso con este gas, conteniendo una cantidad adecuada de desoxidantes. Sin embargo, cuando hablamos de acero de baja aleación, se eleva su contenido en carbono gracias al metal depositado. El resultado en todo caso es la obtención de soldaduras oxidadas, pero sin problemas de porosidad, siempre y cuando el metal de aporte contenga contenidos adecuados de desoxidantes. De todas formas, siempre se recomienda la mezcla con gases inertes.

3.3 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

La especificación del procedimiento de soldeo (Welding Procedure Specification o WPS) por ensayo del procedimiento se debe realizar antes de soldar en producción.

El fabricante debe preparar una especificación preliminar del procedimiento de soldadura (Preliminary Welding Procedure Specification o pWPS). Cada pWPS se debe utilizar como base para establecer el Registro de Cualificación del Procedimiento de Soldadura (Welding Procedure Qualification Record o WPQR) de acuerdo con cualquiera de los métodos de cualificación disponibles.

Si la cualificación supone el soldeo de cupones de ensayo, estos se deben soldar de acuerdo con la pWPS.

El WPQR debe contener todas las variables (esenciales y no esenciales), así como los rangos especificados de cualificación de acuerdo con la norma apropiada. En base al WPQR, se debe elaborar la WPS para producción.

3.3.1 Procesos de soldeo

El caso que nos ocupa es el de desarrollar una especificación del procedimiento de soldadura de aceros por arco, mediante el método de ensayos del procedimiento de soldeo.

El soldeo por arco y con gas queda cubierto por los siguientes procesos, de acuerdo con la norma EN ISO 4063:

- 111 – soldeo manual con electrodo revestido (en inglés Shielded Metal Arc Welding, SMAW o Manual Metal Arc, MMA).
- 114 – soldeo por arco con alambre tubular autoprotegido (en inglés Flux Cored Arc Welding, FCAW).
- 12 – soldeo por arco sumergido (en inglés Submerged Arc Welding, SAW).
- 131 – soldeo por arco con gas inerte (en inglés Metal Inert Gas, MIG o Gas Metal Arc Welding, GMAW).
- 135 – soldeo por arco con gas activo (en inglés Metal Arc Welding, MAG o GMAW)
- 136 – soldeo por arco con alambre tubular y protección de gas activo (en inglés Flux Cored Arc Welding Shielded, FCAW-S)
- 137 – soldeo por arco con alambre tubular y protección de gas inerte (FCAW-S)
- 141 – soldeo por arco con gas inerte y electrodo de wolframio (en inglés Tungsten Inert Gas, TIG o Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)

3.3.2 Especificación preliminar del procedimiento de soldadura (pWPS)

La especificación preliminar del procedimiento de soldadura se debe preparar de acuerdo a la norma **UNE-EN ISO 15609-1:2004**.

Una especificación debe proporcionar toda la información necesaria requerida para realizar la soldadura. Las especificaciones de procedimiento de soldeo cubren un cierto rango de espesores del material, así como un rango de metales base y consumibles de soldeo.

Se deben especificar, por tanto, los rangos y tolerancias de acuerdo con las normas correspondientes, con la experiencia del fabricante y con las recomendaciones adicionales, si procede (en nuestro caso, debemos atender a los posibles requerimientos adicionales de la Sociedad de Clasificación).

3.3.3 Ensayo del procedimiento de soldadura. Cupón de ensayo

La unión soldada correspondiente al procedimiento de soldadura que se está cualificando debe estar representada por uno o varios cupones de ensayo normalizados. Cuando los requisitos de geometría de la unión no representen los cupones de ensayo normalizados que se contemplan en la norma, se debe utilizar otro método normalizado.

Forma y medidas de los cupones de ensayo

La longitud del cupón de ensayo, o el número de ellos, debe ser suficiente para permitir que se realicen todos los ensayos requeridos.

Pueden prepararse cupones de ensayo adicionales, o más largos, con el fin de disponer de material para ensayos adicionales o contraensayos.

Para todos los cupones de ensayo excepto para las ramificaciones (injertos de tubería) y para las uniones en ángulo, el espesor del material, t , debe ser el mismo tanto para las chapas como para los tubos que se van a soldar.

Si lo requiere la norma de aplicación, se debe marcar en el cupón de ensayo la dirección de laminación cuando se requieran ensayos de impacto de la zona afectada térmicamente (ZAT).

La forma y medidas mínimas de los cupones de ensayo que vamos a preparar, en nuestro caso, deben ser las indicadas en la figura 16, donde

- a es la semi-longitud del cupón, mínimo 150 mm.
- D es el diámetro exterior del tubo.
- t es el espesor de pared del tubo.

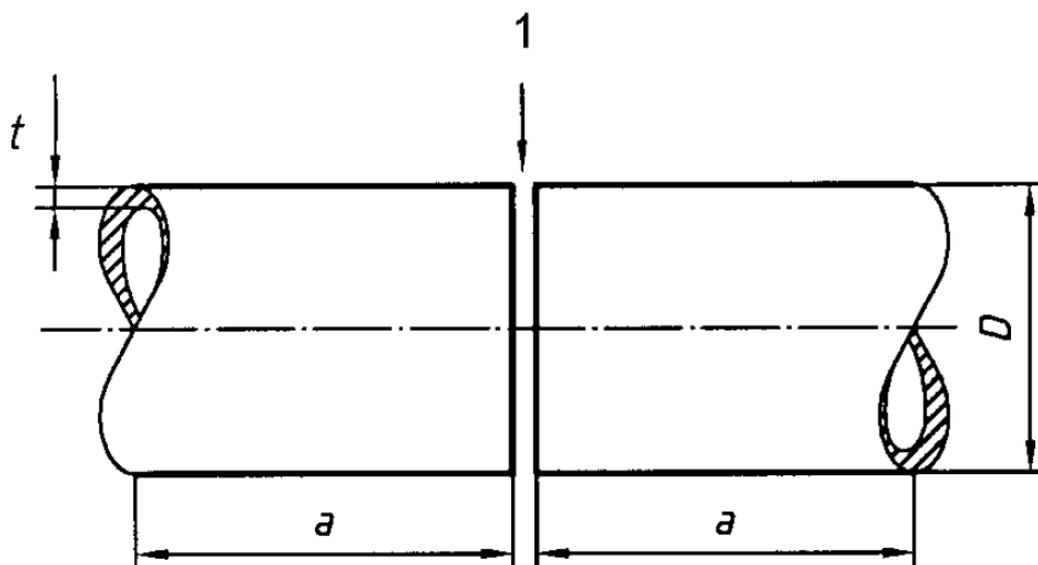


Figura 16. Forma y dimensiones del cupón de ensayo para soldadura a tope de tubos. UNE-EN ISO 15614:2004. 2005

Soldeo de los cupones de ensayo

La preparación y el soldeo de los cupones de ensayo se deben llevar a cabo de acuerdo con la pWPS, teniendo en cuenta las condiciones generales de soldeo en reproducción a las que los cupones de soldeo deben representar. Las posiciones de soldeo y las limitaciones para los ángulos de pendiente y de rotación del cupón de ensayo deben estar de acuerdo con la Norma EN ISO 6947. Si los puntos de soldadura van a quedar incorporados a la unión final, también se deben incluir en el cupón de ensayo.

Una persona u organismo examinador debe supervisar tanto el soldeo como el ensayo de los cupones. En nuestro caso, el Jefe del Departamento de Inspección y Control de Calidad del astillero y el inspector de la Sociedad de Clasificación serán los encargados de dicha labor.

3.3.4 Exámenes y ensayos

Alcance de los ensayos

Los ensayos incluyen tanto los no destructivos (END) como los destructivos, que deben estar de acuerdo con los requisitos de la tabla 14.

Las normas de aplicación pueden especificar ensayos adicionales, tales como:

- Tracción longitudinal de la soldadura.
- Doblado del metal de soldadura
- Ensayos de corrosión
- Análisis químico

- Examen micrográfico
- Examen de ferrita delta ($Fe\delta$)
- Ensayo en cruz

Para el procedimiento que queremos desarrollar, debemos atender a los posibles requisitos adicionales que establezca la Sociedad de Clasificación en sus reglas (ver apdo. 3.4.4).

Tabla 14. Ensayos requeridos según norma UNE-EN ISO 15614

Tipo de ensayo	Alcance del ensayo
Visual	100%
Radiográfico o ultrasónico ^a	100%
Detección de grietas superficiales ^b	100%
Tracción transversal	2 probetas
Doblado transversal ^c	4 probetas
Ensayo de impacto ^d	2 juegos
Ensayo de dureza ^e	Requerido
Examen macrográfico	1 probeta

a. El ensayo ultrasónico no se debe utilizar para $t < 8$ mm ni para materiales de los grupos 8, 10 y 41 a 48.
b. Ensayo por líquidos penetrantes o partículas magnéticas. En materiales no magnéticos, por líquidos penetrantes.
c. Para los ensayos de doblado véase el apartado 3.5.4
d. Un juego en el metal de soldadura y un juego en la ZAT para materiales con espesor ≥ 12 mm que tengan especificadas propiedades de impacto.
e. Las normas de aplicación pueden requerir ensayo de impacto por debajo de 12 mm de espesor. La temperatura de ensayo la debe elegir el fabricante teniendo en cuenta la aplicación o la norma de aplicación, es necesario que no sea menor que la de la especificación del metal base.

3.3.5 Rango de cualificación

Para obtener la homologación de la especificación se deben satisfacer cada una de las condiciones de ensayo.

Los cambios que se salgan de los rangos especificados necesitarán un nuevo ensayo del procedimiento de soldeo.

Relacionados con el fabricante

Una cualificación de una pWPS obtenida por un fabricante mediante ensayo del procedimiento de soldeo de acuerdo con esta norma es válida para soldar en talleres o en campo bajo los mismos controles técnicos y de calidad de dicho fabricante.

El fabricante tiene la total responsabilidad de la soldadura realizada que tiene que someterse al mismo control técnico y de calidad que en el ensayo del procedimiento.

Relacionados con el material

Con el fin de minimizar el número de ensayos de procedimiento de soldadura, el acero y sus aleaciones se han agrupado de acuerdo con el Informe Técnico CR ISO 15608.

Se requiere una cualificación del procedimiento de soldeo individual para cada metal

base o combinación de metales base no contemplados en el sistema de agrupamiento.

Si un metal base pertenece a dos grupos o subgrupos de materiales, se debe clasificar siempre como perteneciente al grupo o subgrupo con numeración más baja.

Los rangos de cualificación del acero figuran en la tabla 15.

Tabla 15. Rango de cualificación según grupo de materiales. UNE-EN ISO 15614:2004.

Grupos o subgrupos de materiales del cupón de ensayo	Rango de cualificación
1 - 1	1 ^a - 1
2 - 2	2 ^a - 2, 1 - 1, 2 ^a - 1
3 - 3	3 ^a - 3, 1 - 1, 2 - 1, 2 - 2, 3 - 1, 3 ^a - 2
4 - 4	4 ^b - 4, 4 ^b - 1, 4 ^b - 2
5 - 5	5 ^b - 5, 5 ^b - 1, 5 ^b - 2
6 - 6	6 ^b - 6, 6 ^b - 1, 6 ^b - 2
7 - 7	7 ^c - 7
7 - 3	7 ^c - 3, 7 ^c - 1, 7 ^c - 2
7 - 2	7 ^c - 2 ^a , 7 ^c - 1
8 - 8	8 ^c - 8
8 - 6	8 ^c - 6 ^b , 8 ^c - 1, 8 ^c - 2, 8 ^c - 4
8 - 5	8 ^c - 5 ^b , 8 ^c - 1, 8 ^c - 2, 8 ^c - 4, 8 ^c - 6.1, 8 ^c - 6.2
8 - 3	8 ^c - 3 ^a , 8 ^c - 1, 8 ^c - 2
8 - 2	8 ^c - 2 ^a , 8 ^c - 1
9 - 9	9 ^b - 9
10 - 10	10 ^b - 10
10 - 8	10 ^b - 8 ^c
10 - 6	10 ^b - 6 ^b , 10 ^b - 1, 10 ^b - 2, 10 ^b - 4
10 - 5	10 ^b - 5 ^b , 10 ^b - 1, 10 ^b - 2, 10 ^b - 4, 10 ^b - 6.1, 10 ^b - 6.2
10 - 3	10 ^b - 3 ^a , 10 ^b - 1, 10 ^b - 2
10 - 2	10 ^b - 2 ^a , 10 ^b - 1
11 - 11	11 ^b - 11, 11 ^b - 1

a. Cubre aceros con igual o menor límite elástico especificado dentro del mismo grupo.
b. Cubre los aceros del mismo subgrupo y aquellos subgrupos inferiores dentro del mismo grupo.
c. Cubre todos los aceros del mismo subgrupo.

Espesor del material base y diámetro del tubo

Para la cualificación de un único proceso, el espesor, t , se refiere al espesor del metal base, bien sea el espesor de las chapas o el de pared del tubo soldado.

La cualificación de un ensayo de procedimiento de soldadura para uniones a tope, en T, ramificaciones y uniones en ángulo con un material de espesor t debe incluir la cualificación para espesores en los siguientes rangos (tabla 16):

Tabla 16. Rango de cualificación según espesor de acuerdo con UNE-EN ISO 15614

Espesor del cupón de ensayo t	Rango de cualificación	
	Pasada única	Pasadas múltiples
$t \leq 3$	0,7· t a 1,3· t	0,7· t a 2· t
$3 < t \leq 12$	0,5· t (3 mm mín.) a 1,3· t ^a	3 mm a 2· t
$12 < t \leq 100$	0,5· t a 1,1· t	0,5· t a 2· t
$t > 100$	No aplicable	50 mm a 2· t

a. Cuando se especifiquen requisitos de impacto, el límite de cualificación es 12 mm salvo que se realicen ensayos de impacto.

La cualificación de un ensayo de un procedimiento de soldeo con un diámetro D incluye la cualificación para los diámetros en los rangos que figuran en la siguiente tabla. La

calificación para chapas cubre tubos cuando el diámetro exterior es > 500 mm o cuando el diámetro sea > 150 mm soldado en las posiciones PA o PC con el tubo girando.

Tabla 17. Rango de cualificación según diámetros de acuerdo con UNE-EN ISO 15614.

Diámetro del cupón de ensayo D (mm)	Rango de cualificación
$D \leq 25$	$0,5 \cdot D$ a $2 \cdot D$
$D > 25$	$\geq 0,5 \cdot D$ (25 mm mín.)

Comunes a todos los procedimientos de soldeo

Procesos de soldeo

Cada grado de mecanización se debe cualificar independientemente (manual, parcialmente mecanizada, totalmente mecanizada o automática). Del mismo modo, no está permitido cambiar el tipo de implantación (manual, mecanizada o automática).

La cualificación es válida únicamente para el o los procesos de soldeo utilizados en el ensayo de procedimiento de soldadura.

Para procedimientos con procesos múltiples, la cualificación del procedimiento de soldadura se puede llevar a cabo mediante ensayos de procedimiento de soldeo separados para cada proceso. También es posible realizar el ensayo del procedimiento de soldadura ensayando un procedimiento multiproceso. La cualificación de tal ensayo sólo es válida para la secuencia de aplicación de los procesos que se haya desarrollado durante el ensayo de cualificación.

Posiciones de soldeo

La soldadura de un cupón de ensayo en una posición (tubo o chapa) cualifica para el soldeo en todas las posiciones (tubo o chapa) excepto para PG y J-L045 donde se requiere un ensayo del procedimiento de soldeo específico.

Cuando se especifican requisitos de impacto y/o dureza, los ensayos de impacto se deben realizar en la posición de mayor aporte térmico de la soldadura y el ensayo de dureza se debe realizar en la posición con menor aporte térmico con la finalidad de cualificar todas las posiciones. Por ejemplo, la posición de mayor aporte para soldaduras a tope normalmente es la posición PF y la de menor, la posición PC. Para soldaduras de tuberías en posición fija, los ensayos de dureza se deben tomar de la posición de soldeo bajo techo (PE).

Cuando no se especifican requisitos de impacto ni dureza, el soldeo en cualquier posición cualifica para el soldeo en todas las posiciones, tanto en chapa como en tubería.

En el anexo VI se pueden ver todas las posiciones estandarizadas para chapas y tubos.

Tipo de unión

El rango de cualificación para los tipos de uniones soldadas es el utilizado en el ensayo del procedimiento de soldadura, teniendo en cuenta las limitaciones que pueden existir en otros apartados (por ejemplo, diámetro o espesor) y, adicionalmente:

Las soldaduras a tope cualifican las soldaduras a tope con penetración total y parcial y las soldaduras en ángulo. Se deben requerir ensayos de soldadura en ángulo cuando esta sea la forma predominante del soldeo en producción.

- Las soldaduras a tope de tubo también cualifican las ramificaciones con ángulos $\alpha \geq 60^\circ$.
- Las uniones en T soldadas a tope solo cualifican las uniones en T soldadas a tope y las soldaduras en ángulo.
- Las soldaduras realizadas por un solo lado sin respaldo cualifican a las soldaduras realizadas por ambos lados y a las soldaduras con respaldo.
- Las soldaduras realizadas con respaldo cualifican a las soldaduras realizadas por ambos lados.
- Las soldaduras realizadas por ambos lados sin resanado cualifican a las soldaduras realizadas por ambos lados con resanado,
- El soldeo en ángulo sólo cualifica al soldeo en ángulo
- No se permite cambiar los depósitos mediante pasadas múltiples por pasada única (o pasada única por ambos lados) o viceversa para un determinado proceso.

Material de aporte

Los materiales de aporte cubren a otros siempre y cuando tengan equivalentes propiedades mecánicas, mismo tipo de recubrimiento o fundente, misma composición nominal y el mismo o menor contenido de hidrógeno, de acuerdo con la designación en la norma europea apropiada para el material de aporte considerado.

Se permite un cambio en el tamaño del material de aporte asegurando que se satisfacen los requisitos de aporte térmico.

Tipo de corriente

La cualificación es válida para el tipo de corriente (alterna, continua o pulsada) y para la polaridad utilizada en el ensayo del procedimiento de soldeo.

Aporte térmico

Cuando se requieran ensayos de impacto, el límite superior del aporte térmico

cualificado es un 25% mayor que el utilizado en el cupón de ensayo. Cuando se requieran ensayos de dureza, el límite inferior del aporte térmico cualificado es un 25% menor que el utilizado en el cupón de ensayo.

Si los ensayos del procedimiento se han realizado con un aporte térmico bajo y uno alto, entonces todos los intermedios están cualificados.

Temperatura de precalentamiento

Cuando se requiera precalentamiento, el límite inferior de cualificación es la temperatura de precalentamiento nominal aplicada al comienzo del ensayo del procedimiento de soldeo.

Temperatura entre pasadas

El límite superior de la cualificación corresponde a la mayor temperatura entre pasadas alcanzada durante el ensayo del procedimiento de soldadura.

Post-calentamiento

La temperatura y duración del post-calentamiento para eliminación de hidrógeno no debe reducirse. No debe omitirse, pero puede añadirse.

Tratamiento térmico inicial

No se permite ningún cambio en la condición de tratamiento térmico inicial previa al soldeo de los materiales endurecibles por precipitación.

Tratamiento térmico posterior

No se permite añadir o eliminar un tratamiento térmico posterior al soldeo.

El rango de temperaturas cualificado es la temperatura de mantenimiento utilizada en el ensayo del procedimiento con un margen de $\pm 20^\circ \text{C}$, a no ser que se especifique otra cosa. Cuando sea requerido, las velocidades de calentamiento y enfriamiento, así como el tiempo de mantenimiento, se deben determinar en función del componente fabricado.

Rangos de cualificación específicos de cada proceso de soldeo

Proceso 131 – Soldeo por arco con gas inerte (Metal Inert Gas, MIG o Gas Metal Arc Welding, GMAW)

Para todos los procesos con protección de gas activo (GMAW y FCAW), la cualificación obtenida para el gas de protección está limitada al símbolo del gas de acuerdo con la norma EN 439. No obstante, el contenido de CO_2 no debe superar en más de un 10% el utilizado durante la cualificación del procedimiento. Los gases de protección no recogidos en aquella norma quedan restringidos a la composición nominal utilizada en el ensayo.

La cualificación obtenida está limitada al sistema de alambre utilizado durante el ensayo del procedimiento de soldadura (alambre único o alambre múltiple)

Para los alambres macizos y los huecos con relleno metálico, la cualificación empleando transferencia por cortocircuito sólo cualifica la transferencia por cortocircuito. La cualificación empleando transferencia globular o spray cualifica ambas.

Proceso 141 – soldeo por arco con gas inerte y electrodo de wolframio (Metal Inert Gas, MIG o Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)

La cualificación obtenida para el gas de protección y de respaldo está limitada al símbolo del gas de acuerdo con la norma EN 439. La cualificación de los gases de protección no contemplados en aquella norma queda restringida a la composición nominal utilizada durante el ensayo.

El ensayo del procedimiento de soldeo realizado sin gas de respaldo cualifica el procedimiento de soldeo con gas de respaldo.

El soldeo con material de aporte no cualifica al soldeo sin material de aporte y viceversa.

3.4 REGLAS DE CLASIFICACIÓN

En aplicaciones off-shore, el desarrollo y posterior aplicación de cierto procedimiento de soldadura están sujetos a la aprobación de una Sociedad de Clasificación.

Las Sociedades de Clasificación son organismos no gubernamentales, independientes y sin ánimo de lucro que funcionan a modo de empresas aseguradoras, certificando mediante su sello el cumplimiento de las *Reglas de Clasificación*, desarrolladas para promover la seguridad de la vida humana y propiedades, así como la protección del entorno marino.

En nuestro caso, el procedimiento que estamos desarrollando se acoge a las Reglas de Clasificación de Bureau Veritas; concretamente a la **NR 216, Ch 5, Sec. 4: Approval of Welding Procedures**.

Esta sección especifica los requerimientos para la aprobación de procedimientos de soldadura por arco de aceros. Los requerimientos relativos a materiales no cubiertos en la norma son tratados de manera independiente, siguiendo en la medida de lo posible, el criterio especificado en esta sección. A continuación, nos centraremos en los aspectos generales y en los aplicables a nuestro procedimiento.

3.4.1 Procesos de soldeo

Los ensayos de cualificación son, según esta norma, requeridos tanto para los procesos manuales, semiautomáticos o automáticos de soldadura por arco y con gas de aceros (ver apdo. 3.3.1).

3.4.2 Especificación preliminar del procedimiento de soldadura (pWPS)

Una especificación de procedimiento de soldadura (WPS) tiene que ser preparada por el fabricante o astillero que pretende llevar a cabo las pruebas para la homologación. Este documento debe estar referido a una especificación preliminar del procedimiento de soldadura (pWPS) y ha de ser remitido a la Clase para una revisión previa a los ensayos.

Este pWPS puede ser modificado y enmendado durante las pruebas de homologación tantas veces como sea necesario; sin embargo, todas las variables relativas al procedimiento han de estar mencionadas.

En caso de que los cupones de prueba realizados de acuerdo a los parámetros de la especificación preliminar muestren resultados no satisfactorios, el pWPS debe ser ajustado por el astillero o taller. El nuevo procedimiento preliminar tiene que ser de nuevo remitido y las muestras preparadas para ensayo.

Los cupones de ensayo son elegidos de modo que queden cubiertas todas las posibilidades de producción de soldadura, de acuerdo con los rangos de aprobación establecidos en esta norma.

Aprobación del procedimiento de soldadura

Las pruebas de homologación, el proceso de soldeo de los cupones de ensayo de acuerdo al procedimiento preliminar y los ensayos en cuestión han de ser realizados en presencia del inspector de la Sociedad de Clasificación.

Una vez las pruebas han sido completadas de manera satisfactoria, la Clase puede aprobar el pWPS como un procedimiento de soldadura.

En su versión final, el procedimiento de soldadura (WPS) debe incluir todos los parámetros característicos del proceso de soldeo, a saber:

- Tipo de proceso de soldeo y equipo.
- Tipo de unión, preparación y material de respaldo, si procede.
- Material base y rango de espesores.
- Metal de aporte.
- Posición de soldeo

- Pre calentamiento mínimo y rango de temperatura entre pasadas.
- Tratamiento térmico post-soldeo, si procede.
- Gas de protección, si procede.
- Parámetros de soldeo.
- Otra información relativa a la técnica de soldadura, si procede.

Los parámetros reales usados para soldar los cupones aprobados y los resultados de las inspecciones y ensayos llevados a cabo han de mostrarse en el WPQR, así como en el registro de aprobación del procedimiento de soldadura (en inglés Welding Procedure Approval Record o, por sus siglas, WPAR).

El WPQR generalmente es preparado por el astillero o el taller y ratificado por el inspector de la Clase.

Inspecciones

Las inspecciones y las pruebas de control se realizan de manera periódica y aleatoria tantas veces como estime la Clase y deben resultar satisfactorios para mantener la validez de la aprobación.

El resultado de las pruebas realizadas a cualquier muestra de la producción, si es satisfactorio, podrá ser aceptado siempre a criterio del inspector.

Responsabilidad de los usuarios

Los ensayos de cualificación están destinados a verificar que el productor (taller o astillero) está adecuadamente cualificado para realizar operaciones de soldeo siguiendo un procedimiento en particular.

Independientemente de las inspecciones llevadas a cabo por el inspector de la Clase, el usuario es el responsable del uso del procedimiento aprobado dentro del rango homologado y en las condiciones fijadas en el momento de la aprobación.

El cumplimiento de las condiciones anteriormente mencionadas resulta esencial en la validez de la homologación.

La regla seguida a la hora de preparar los cupones para la aprobación del procedimiento recoge los ensayos que se deben llevar a cabo para cada caso de soldadura (chapas a tope, chapas en ángulo y tubos a tope). Aquí nos centraremos en describir los requisitos para la homologación de soldadura de tubos a tope con penetración total.

3.4.3 Cupón de ensayo

Tabla 18. Ensayos requeridos según las Reglas de Clasificación de Bureau Veritas.

Tipo de ensayo o prueba	Extensión del ensayo o prueba
Inspección visual	100%
Inspección superficial de grietas ^a	100%
Inspección radiográfica o por ultrasonidos	100%
Ensayo de tracción transversal	2 probetas
Ensayo de doblado transversal ^b	2 probetas de raíz y 2 de cara
Ensayo de impacto ^c	3 juegos de probetas
Examen macrográfico	En 1 sección
Ensayo de dureza ^d	En 1 sección
Ensayo de tracción longitudinal ^e	1 probeta
a. Inspección por líquidos penetrantes, de acuerdo con ISO 3452 (o norma equivalente aceptada) o por partículas magnéticas; para materiales no magnéticos, líquidos penetrantes exclusivamente.	
b. Para espesores $t \geq 12$ mm, se realizarán 4 ensayos de doblado lateral.	
c. 3 juegos de 3 probetas, según regla.	
d. Sólo requerido para aceros de alta resistencia con límite elástico mínimo especificado igual o mayor a 355 N/mm ² .	
e. Sólo requerido cuando se acepta el empleo de un metal de aporte no aprobado por la Clase.	

Montaje y soldadura

Las Reglas de Clasificación no hacen ninguna reseña diferente a lo comentado en el apartado 3.3.3.

3.4.4 Exámenes y ensayos

Los ensayos destructivos y no destructivos requeridos se realizarán de acuerdo con la tabla 18.

La sociedad de clasificación requiere algunos ensayos adicionales (ver apdo. 3.3.4).

3.4.5 Rango de cualificación

Rango de espesores

La homologación de un procedimiento de soldadura llevado a cabo en un montaje soldado de espesor t es válido para un rango de espesores según la tabla 19.

Tabla 19. Rango de aprobación en función del espesor según Reglas de Clasificación de BV.

Espesor t de la pieza ^a (mm)	Rango de aprobación	
	Uniones a tope y en "T" con una sola pasada o una pasada por cada lado	Uniones a tope y en "T" con varias pasadas y soldadura en ángulo ^b
$3 < t \leq 12$	De $0,7 \cdot t$ a $1,1 \cdot t$	De 3 mm a $2 \cdot t$
$12 < t \leq 100$	De $0,7 \cdot t$ a $1,1 \cdot t$ ^c	De $0,5 \cdot t$ a $2 \cdot t$ (máx. 150 mm)
a. Para procedimientos con varios procesos de soldeo, el espesor cubierto por cada proceso será usado como base para establecer el rango de espesor de cada uno de manera individual.		
b. Para soldadura en ángulo, el rango de aprobación se aplica a ambos materiales unidos.		
c. Para aportes térmicos altos, mayores de 50 kJ/cm, el límite superior del rango de aprobación será $1 \cdot t$.		

La Sociedad de Clasificación establece un rango más estricto de aprobación para soldaduras a tope con una sola pasada (ver apdo. 3.3.5).

Rango de diámetros de tubería

La Sociedad de Clasificación se atiene a lo indicado en la norma.

Proceso de soldeo

La Regla de Clasificación no especifica un requisito especial a este respecto.

Posición de soldeo

En tanto en cuanto la posición de soldeo, la Clase rigidiza su criterio, en comparación con la normativa internacional (ver apdo. 3.3.5).

La aprobación de un cupón soldado en una cierta posición está limitada a ésta exclusivamente.

Para homologar todas las posiciones, los cupones de prueba han de ser soldados en las posiciones de menor y mayor aporte térmico y han de someterse a todos los ensayos aplicables.

Tipo de unión

El rango de aprobación según el tipo de junta es el mismo que marca la norma.

Sin embargo, pueden ser requeridos nuevos ensayos cuando un cambio en la geometría del biselado de la unión pueda afectar, a criterio del inspector de Clase, la penetración o fusión.

Consumibles

Excepto para procesos de alto aporte térmico (sobre 50 kJ/cm), los consumibles aprobados cubren el uso de otros del mismo grado.

Un cambio de la marca comercial requerirá nuevas pruebas de aprobación cuando los ensayos de impacto hubieron de realizarse a una temperatura inferior a -20° C.

Aporte térmico

Bureau Veritas, en sus reglas, no difiere de la normativa europea; no obstante, fija un valor para el aporte térmico máximo. El límite superior del aporte térmico aprobado será un 25% mayor que el usado durante las pruebas de homologación o 50 kJ/cm, el que sea menor, salvo en caso de que el límite superior sea un 10% mayor que aquel para procesos de alto aporte térmico.

El límite inferior será un 25% menor que el usado durante las pruebas.

Pre calentamiento y temperatura entre pasadas

La temperatura mínima de pre calentamiento no será menor que la usada durante las

pruebas de cualificación.

La temperatura mínima entre pasadas no será menor que la temperatura de precalentamiento especificada. La máxima no será mayor que la usada en las pruebas.

3.4.6 Requisitos adicionales para aceros inoxidables.

Bureau Veritas en sus Reglas de Clasificación para la aprobación de especificaciones de procedimiento de soldadura dedica un apartado exclusivo a los requisitos adicionales que se deben considerar para el desarrollo y aprobación de una WPS para aceros inoxidables Cr-Ni austeníticos y austenítico-ferríticos.

El cupón de ensayo y los requisitos para la aprobación de la WPS serán tratados caso por caso y se aplicarán, siempre que sea posible, los requisitos señalados anteriormente.

Se puede solicitar un examen de la composición química del metal de soldadura y, en caso de aceros austenítico-ferríticos, también se puede requerir un ensayo de la estructura metalográfica del metal de soldadura para determinar el contenido medio de ferrita. Los valores de aceptación están entre el 25% y el 65% según **ASTM E 562**.

No se requieren ensayos de impacto en el caso de acero austeníticos y sólo a -20°C para aceros austenítico-ferríticos. En tal caso, el valor de la energía absorbida no debe ser menor de 27 J .

Por último, dependiendo del tipo de acero, se puede solicitar un examen de corrosión convencional, de acuerdo con la normativa correspondiente.

3.5 ENSAYOS

Como comentamos anteriormente, para obtener la aprobación de la especificación del proceso de soldeo, es necesario llevar a cabo tanto ensayos no destructivos (END) como destructivos y deben estar de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 15614-1** y con las Reglas de Clasificación descritas en el capítulo anterior (ver apdos. 3.3.4 y 3.4.4).

3.5.1 Situación y obtención de las probetas de ensayo

Las probetas se deben obtener de acuerdo con la figura 17.

Las probetas se deben obtener después de que se hayan realizado todos los ensayos no destructivos (END) con resultados satisfactorios, de acuerdo con los criterios de inspección relevantes para los métodos de END utilizados.

Es aceptable obtener las probetas evitando los lugares que tengan imperfecciones admisibles para los métodos de END aplicados.

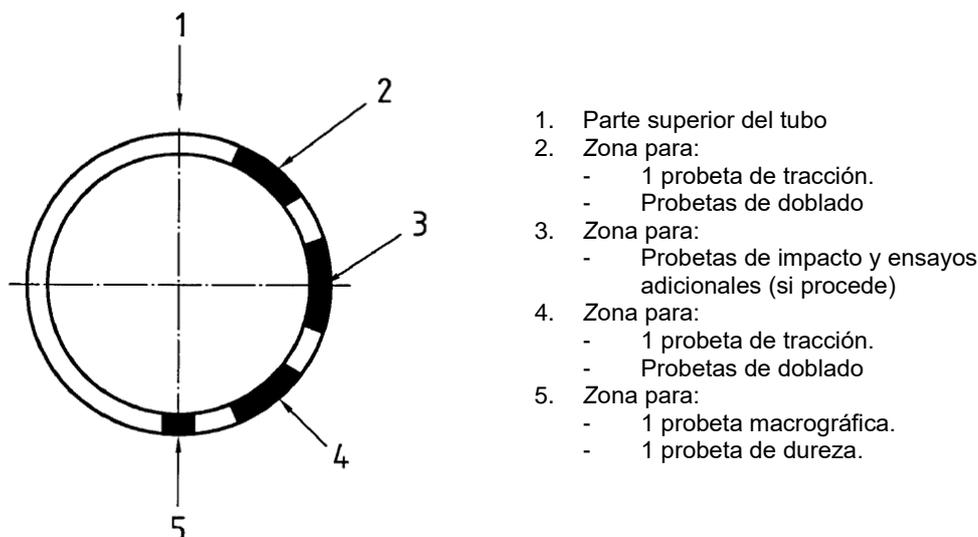


Figura 17. Zonas de extracción de probetas del cupón de ensayo. Bureau Veritas.

3.5.2 Ensayos no destructivos

Antes de obtener las probetas de ensayo, los cupones se deben examinar mediante ensayos no destructivos de acuerdo con los apartados 3.3.4 y 3.4.4 y las tablas 14 y 18. Cualquier tratamiento térmico que esté especificado se debe realizar antes que los END.

En los materiales susceptibles al agrietamiento inducido por hidrógeno y cuando no esté especificado post-calentamiento o tratamiento térmico posterior al soldeo, los ensayos no destructivos se deberían retrasar.

3.5.3 Ensayo de tracción transversal

Las probetas y los ensayos de tracción transversal para uniones a tope deben estar de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 4136** y siempre deberán cumplir con los requisitos adicionales que pueda solicitar la Sociedad de Clasificación.

Para tubos con diámetro exterior $D > 50$ mm, el sobreespesor de soldadura se debe retirar de ambas caras con el fin de obtener una probeta con el mismo espesor que el de la pared del tubo. Para $D \leq 50$ mm y cuando se utilicen probetas de sección total para tuberías de pequeño diámetro, se puede dejar el sobreespesor de soldadura de la superficie interna de la tubería.

La resistencia a tracción de la probeta no debe ser inferior al valor mínimo especificado correspondiente al metal base, a no ser que se especifique otra cosa antes del ensayo. Para uniones con metales base distintos, la resistencia a tracción no debe ser inferior al menor valor mínimo especificado de los metales base.

Las Reglas de Clasificación de Bureau Veritas requieren además que se reporte la localización de la fractura.

3.5.4 Ensayo de doblado

Las probetas y los ensayos de doblado para uniones a tope deben estar de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 5173** y siempre deberán cumplir con los requisitos adicionales que pueda solicitar la Clase.

Para espesores < 12 mm se deben ensayar dos probetas de cara y dos de raíz. Para espesores ≥ 12 mm se recomienda ensayar cuatro probetas de doblado lateral en lugar de las de cara y raíz.

Para uniones de metales distintos o uniones heterogéneas a tope de chapas, se puede utilizar una probeta de ensayo de doblado longitudinal de cara y una de raíz en lugar de cuatro ensayos de doblado transversal.

El diámetro del mandril o del rodillo interior debe ser 4 veces el espesor de la probeta y el ángulo de doblado debe ser de 180° para metales base con alargamiento $A \geq 20\%$. Para metales base con alargamiento $A < 20\%$ se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$d = \frac{100 \times t_s}{A} - t_s$$

donde

- d es el diámetro del mandril o del rodillo interior,
- t_s es el espesor de la probeta de doblado y
- A es el alargamiento mínimo requerido por la especificación del material.

Durante el ensayo, las probetas no deben revelar ningún defecto abierto mayor de 3 mm en cualquier dirección. Los fallos que aparezcan en las esquinas de una probeta durante el ensayo se deben ignorar en su evaluación.

3.5.5 Examen macroscópico

La probeta de ensayo se debe preparar y atacar de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 17639** por una de sus caras para revelar claramente la línea de fusión, la ZAT y las diferentes pasadas.

El examen macroscópico debe incluir el metal base no afectado y se debe registrar como mínimo una reproducción macrográfica por cada ensayo de procedimiento.

Los niveles de aceptación deben estar de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 5817**.

3.5.6 Ensayo de impacto

El ensayo y las probetas para el ensayo de impacto deben estar de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 15614-1** en relación con la sustitución de las probetas y la temperatura de ensayo, y con la norma **UNE-EN ISO 9016** para las medidas y la realización del ensayo. Adicionalmente, se ha de tener en cuenta las recomendaciones y requisitos especificados en las Reglas de Clasificación.

Para el metal de soldadura se deben emplear probetas tipo VWT (V: entalla en V Charpy; W: entalla en el metal de soldadura; T: entalla a través del espesor) y para la ZAT, probetas tipo VHT (V: entalla en V Charpy; H: entalla en la zona afectada térmicamente; T: entalla a través del espesor). En cada situación especificada cada juego debe comprender tres probetas.

Se deben obtener probetas con la entalla en V Charpy a un máximo de 2 mm por debajo de la superficie del metal base y transversales a la soldadura. En la ZAT la entalla debe estar a una distancia de entre 1 y 2 mm de la línea de fusión y en el metal de soldadura la entalla debe estar en el eje central del cordón. Para espesores mayores de 50 mm, se deben obtener dos juegos adicionales de probetas, uno del metal de soldadura y otro de la ZAT en el centro del espesor o en la zona de raíz de la soldadura.

La energía absorbida debe estar de acuerdo con la especificada en la norma del metal base, a no ser que se establezca otra cosa en la norma de aplicación. El valor medio de las tres probetas debe cumplir los requisitos especificados. Para cada localización de la entalla, uno de los valores puede estar por debajo del valor medio mínimo especificado, hasta un 70% de dicho valor.

En uniones heterogéneas, los ensayos de impacto se deben llevar a cabo con probetas de cada ZAT de cada metal base.

Cuando se cualifiquen varios procesos de soldeo con un solo cupón de ensayo, las probetas de impacto se deben obtener del metal de soldadura y de la ZAT de cada proceso.

3.5.7 Ensayo de dureza

Se deben realizar ensayos de dureza Vickers con una carga de HV10 de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 9015-1**. Las medidas de dureza se deben tomar en la soldadura, zonas afectadas térmicamente y metal base, con el fin de evaluar el rango de los valores de la dureza a través de la unión. Para materiales con espesores menores o iguales a 5 mm, solo se debe realizar una línea de indentaciones a una profundidad de hasta 2 mm por debajo de la superficie superior de la unión soldada. Para materiales con espesores superiores a 5 mm se deben realizar dos líneas de indentaciones a una profundidad de hasta 2 mm por debajo

de las superficies superior e inferior de la unión soldada. Para las soldaduras realizadas por ambos lados, en ángulo y a tope en T, se debe realizar una línea adicional de indentaciones a través de la zona de la raíz.

Se deben realizar en cada línea al menos tres indentaciones en las siguientes zonas:

- Soldadura.
- Ambas zonas afectadas térmicamente
- Ambos metales base.

En la ZAT la primera indentación se debe situar tan próxima como sea posible de la línea de fusión.

Los resultados de los ensayos no deben sobrepasar los valores de dureza máxima recogidos en la tabla 20. Sin embargo, los requisitos para los grupos 6 (no tratados térmicamente), 7, 10 y 11 y para cada unión de metales diferentes se deben especificar antes del ensayo.

Tabla 20. Límite máximo de dureza Vickers HV10 para cupones de ensayo.

Grupos de acero CR ISO 15608	Sin tratamiento térmico	Con tratamiento térmico
1 ^a , 2	380	320
3 ^b	450	380
4, 5	380	320
6	-	350
9.1	350	300
9.2	450	350
9.3	450	350

a. Si se requieren ensayos de dureza.
b. Para aceros con $R_{eH} > 890 \text{ N/mm}$ se deben especificar valores especiales.

Las Reglas de Clasificación de Bureau Veritas especifican realizar ensayos de dureza para aceros con límite elástico mínimo especificado igual o mayor que 355 N/mm^2 . Del mismo modo, especifica la distancia entre indentaciones, que puede variar desde 0,5 a 2 mm, dependiendo de la zona testada.

Los resultados del ensayo de dureza no pueden exceder de 350 HV para aceros con un límite elástico mínimo especificado menor o igual a 420 N/mm^2 .

3.5.8 Niveles de aceptación

Un procedimiento de soldeo queda cualificado si las imperfecciones del cupón de ensayo están dentro de los límites aceptados para el nivel de calidad B de la norma **UNE-EN ISO 5817**, excepto para las siguientes imperfecciones: exceso de sobreespesor, exceso de convexidad, exceso de garganta y exceso de penetración, a las que se debe aplicar el nivel C.

3.5.9 Contraensayos

Si el cupón de ensayo no cumple cualquiera de los requisitos de la inspección visual o de los END especificados anteriormente, se debe soldar otro cupón de ensayo y someterlo al mismo examen. Si este cupón adicional no cumple los requisitos correspondientes, se considera que no se ha superado el ensayo del procedimiento de soldeo.

Si cualquier probeta de ensayo no cumple los requisitos de los ensayos destructivos de acuerdo con los requisitos especificados en cada norma debido únicamente a imperfecciones de la soldadura, se deben obtener dos probetas de ensayo más por cada una que haya fallado. Estas probetas adicionales pueden extraerse del mismo cupón de ensayo, si hubiese suficiente material disponible, o de uno nuevo. Cada probeta adicional se debe someter a los mismos ensayos que la probeta que falló. Si una cualquiera de estas probetas adicionales no cumple los requisitos aplicables, se considera que no se ha superado el ensayo del procedimiento de soldeo.

Si una probeta de tracción no cumple los requisitos establecidos, se deben obtener dos probetas adicionales por cada una que haya fallado. Ambas probetas adicionales deben cumplir aquellos requisitos.

Si existe valores únicos de dureza por encima de los valores indicados en la tabla 20 en las diferentes zonas de ensayo, se pueden realizar ensayos adicionales (en la cara opuesta de la probeta o después de un amolado suficiente de la superficie ensayada). Ninguno de los valores adicionales de dureza debe exceder de los valores máximos anteriormente indicados.

Para ensayos de impacto Charpy, cuando los resultados de un conjunto de tres probetas no cumplan los requisitos, existiendo un único valor por debajo del 70% se deben obtener tres probetas adicionales. El valor promedio de estas probetas junto con los resultados iniciales no debe ser inferior a la media requerida.

4 RESULTADOS: PWPS Y WPQR

De todo lo descrito hasta el momento se puede concluir que el Registro de Cualificación del Procedimiento de Soldadura (WPQR) es el documento que recoge los resultados que hemos obtenido.

De acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 15614-1:2004**, el fabricante debe incluir en este registro, todas las variables esenciales para la aplicación del procedimiento en la producción. Los cupones de ensayo que se emplearon en la elaboración de este registro fueron soldados de acuerdo con una Especificación Preliminar del Procedimiento de Soldadura (Preliminary Welding Procedure Specification o pWPS).

A continuación, pasamos a detallar los diferentes parámetros de soldeo que se han configurado para la realización del registro.

4.1 PROCESO DE SOLDEO

El objetivo es desarrollar un procedimiento de soldadura que pueda llevarse a cabo tanto en taller como en obra, en el soldeo de tubería de Dúplex y SuperDúplex.

Se decidió elaborar un procedimiento multiproceso para abarcar un amplio rango de combinaciones posibles, teniendo en cuenta la variedad de diámetros y espesores que presentaba el proyecto. Así pues, se escogieron los procesos TIG (141) y MIG (131) para el proceso.

El proceso TIG estaba destinado a las pasadas de raíz, como suele ser habitual en las construcciones soldadas de tuberías, por la buena calidad de la penetración, sin descuelgues de material que puedan obstruir el paso del fluido. Como comentábamos anteriormente, este proceso ofrece, además, unas características mecánicas óptimas, a pesar de su baja tasa de deposición y las limitaciones que presenta su aplicación manual. Cabe destacar el bajo aporte térmico del proceso, lo que supone una ventaja a la hora de controlar la temperatura entre pasadas.

Siguiendo las recomendaciones de soldeo TIG, el proceso se llevará a cabo con electrodo no consumible de tungsteno toriado al 2%. Se soldará con corriente continua, polaridad directa, electrodo negativo (CCPD, E-), consiguiendo un buen rendimiento térmico, una penetración profunda y una velocidad de soldeo rápida.

El proceso MIG se empleó en el relleno y el peinado de la unión. Se trata de la mejor elección, teniendo en cuenta la cantidad de metros de soldadura, así como la buena disponibilidad de equipos en el taller donde se elaborarán los cupones de ensayo. Resulta además útil llevar a cabo la soldadura en obra.

El soldeo “con semiautomática” se hará siguiendo las recomendaciones, con corriente continua, polaridad inversa, electrodo positivo (CCPI, E+), usando la transferencia por arco pulsado, con lo que obtenemos un aporte térmico bajo y una unión limpia.

Para ambos procesos, la protección gaseosa se realiza con el gas inerte **Argón 99,99%**. Resulta ser la opción más económica y disponible, a pesar de las recomendaciones de usar mezclas que pueden producir mejores resultados. Para el gas de respaldo – en el proceso TIG – se optó por el mismo gas, pero con caudales mucho mayores. Así pues, para la protección es suficiente con un caudal de $6 \div 8$ l/min mientras que, para el respaldo hace falta casi tres veces más flujo, entre 18 y 22 l/min.

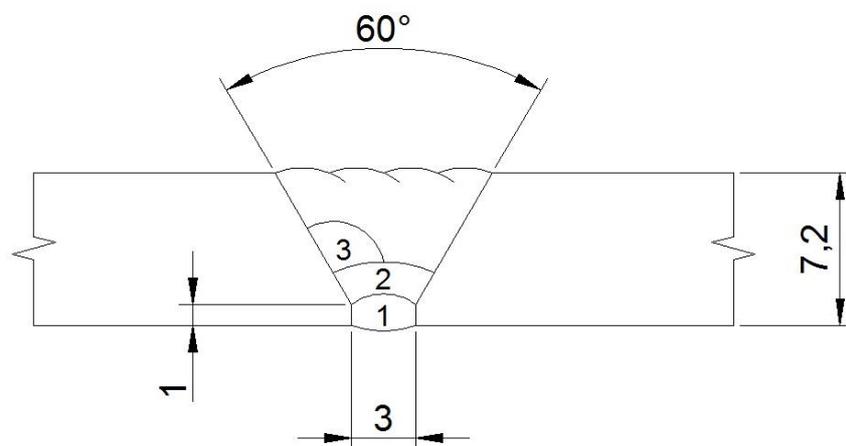


Figura 18. Diseño de la unión del cupón de ensayo y secuencia de soldeo.



Figura 19. Preparación de bordes del cupón de ensayo: unión a tope en V a 60°.

La unión elegida para el soldeo del cupón de ensayo es una unión a tope en V, con un ángulo de chaflán de 60°, un talón de 1 milímetro y una separación de raíz de 3 mm. De esta manera aseguramos la penetración y evitamos la falta de fusión. No será necesario añadir ni separador en la raíz ni respaldo de otra naturaleza que no sea gaseoso. La

secuencia de soldeo queda configurada como se muestra en la figura 18, con dos pasadas de raíz a TIG y el resto, hasta completar el espesor, con semiautomática. El espesor cubierto por las pasadas será de 3 mm para las de raíz, hechas con TIG, y 4 mm para el relleno y el peinado con MIG.

4.2 MATERIAL BASE

El proyecto de fabricación al que está destinado el desarrollo de este procedimiento señala en su especificación el empleo de dos tipos de acero inoxidable, a saber, un acero Dúplex EN 1.4462 y un acero SuperDúplex EN 1.4410 según la norma **UNE-EN 10088-1**.

Para la elaboración de los cupones de ensayo, se optó por un acero inoxidable SuperDúplex X2CrNiMoCuNW25-7-4 (EN 1.4501). Dicho acero queda clasificado dentro del grupo 10.2 – Aceros inoxidables austenítico-ferríticos con Cr > 24.0% según el Informe Técnico **UNE-CEN ISO/TR 15608:2006**.

Tabla 21. Propiedades mecánicas del acero inoxidable SuperDúplex EN 1.4501.

Designación del acero		Límite elástico convencional al 0,2 % R _{p0,2} (MPa)	Resistencia a la tracción R _m (MPa)	Alargamiento en rotura		Energía de impacto (ISO-V) KV ₂ (J) > 10 mm	
Simbólica	Numérica			A ₈₀ (%) < 3 mm	A (%) > 3 mm	Longitudinal	Transversal
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	530	730 – 930	25	25	100	60

El material fue suministrado en tubería sin soldadura de 2 ½” sch. 80S (73,03 x 7,01 mm) laminado en frío, de acuerdo con la norma **UNE-EN 10216-5:2004**.

4.3 METAL DE APORTE

El material de aporte para elaborar el procedimiento de soldadura será coincidente para ambos procesos. En ambos casos, tal y como se ha comentado anteriormente, el material de aporte contiene entre un 2 y un 4% más de níquel que el metal base.

Para el proceso TIG se escogió la varilla **OK Tigrod 2509** de la casa **ESAB**, de 2 mm de diámetro con clasificación **AWS A5.9 ER2594** o **W 25 9 4 N L** según norma **UNE-EN ISO 14343:2010**, que además cuenta con certificado de aprobación de la agencia **VdTÜV**. Se trata de una varilla desnuda de SuperDúplex resistente a la corrosión para el soldeo de aleaciones de inoxidable austenítico-ferrítico. El material de aporte cuenta con alta resistencia a la corrosión intergranular, por picaduras y por tensocorrosión.

El proceso MIG se llevará a cabo con el hilo **ESAB OK Autrod 2509**, de 1,2 mm de diámetro con la misma clasificación que la varilla: **AWS A5.9 ER2594** o **W 25 9 4 N L** según

la norma **UNE-EN ISO 14343:2010**. Dicho alambre está diseñado para la soldadura de aceros SuperDúplex y otros austenítico-ferríticos de bajo contenido en carbono.



Figura 20. Hilo para soldadura GMAW.

Cabe destacar que el alambre para “semiautomática” no cuenta con certificación de alguna sociedad de clasificación, lo que repercutirá en la realización de ensayos adicionales para validar el procedimiento.

4.4 TÉCNICA DE SOLDEO Y OTROS PARÁMETROS



Figura 21. Cupón de ensayo.

En tanto en cuanto la técnica de soldeo, el cupón de ensayo se soldará en la posición H-L045 (6G ascendente). De este modo tendremos cubiertas todas las posiciones de soldeo posibles. Se soldará con múltiples pasadas de cordón oscilante, con electrodo simple y la limpieza y resanado inicial, entre pasadas y final se harán mediante amolado.

Debido a las características del metal base, no se aplicará ningún tratamiento térmico previo ni posterior al soldeo. No obstante, se ha de ser muy meticuloso en el control del aporte

térmico durante el soldeo para no superar la temperatura entre pasadas, fijada en 150° C.

4.5 SOLDEO DEL CUPÓN DE ENSAYO

Para la aprobación del procedimiento (WPS), es condición *sine qua non* que el registro de cualificación (WPQR) se lleve a cabo siguiendo los parámetros y la técnica definida en la especificación preliminar (pWPS); además de la obtención de resultados satisfactorios en los ensayos destructivos y no destructivos. En la tabla 22 figuran los parámetros reales de soldeo del cupón de ensayo.

Tabla 22. Parámetros de soldeo seguidos en el registro de cualificación (WPQR).

Pasada	Proceso	Posición	Material de aporte			
			Nombre comercial	Clasificación	Diámetro (mm)	Corriente y polaridad
1 – 2	141	6G	ESAB OK Tigrod 2509	ER2594	2	CCPI (E+)
3	131	6G	ESAB OK Autrod 2509	ER2594	1,2	CCPD (E-)
4 – n	131	6G	ESAB OK Autrod 2509	ER2594	1,2	CCPD (E-)

Pasada	Gas		Intensidad (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/s)	Aporte térmico (kJ/mm)
	Caudal de protección (l/min)	Caudal de respaldo (l/min)				
1 – 2	6	20	108	15	3,12	0,52
3	6	-	127	26	4,00	0,83
4 – n	6	-	130	29	4,2	0,90

4.6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Se llevaron a cabo todos los ensayos no destructivos requeridos tanto por la norma **UNE-EN ISO 15614-1** como por las Reglas de Clasificación. Los END realizados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 23. Resultado de ensayos no destructivos.

Tipo de ensayo	Alcance	Resultado	Comentarios
Inspección visual	100%	Satisfactorio	
Inspección superficial de grietas	100%	Satisfactorio	Inspección por partículas magnéticas.
Inspección radiográfica o por ultrasonidos	100%	Satisfactorio	Examen radiográfico adicional para certificar el material de aporte sin aprobación de la Clase.

En el Anexo II se recopilan todos los informes de ensayos llevados a cabo.

4.6.1 Inspección visual

El ensayo de inspección visual fue llevado a cabo en las instalaciones del Astillero por personal cualificado, siguiendo los requerimientos del procedimiento interno de la empresa *SP-03 – Inspección visual*.

De acuerdo con el criterio de aceptación de la norma **UNE-EN ISO 5817**, el ensayo resultó satisfactorio.

4.6.2 Inspección superficial de grietas. Inspección por partículas magnéticas

Para la detección de defectos superficiales se llevó a cabo una inspección por partículas magnéticas, de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 17638** para ensayos no destructivos de uniones soldadas.

La evaluación del resultado del ensayo se realizó de acuerdo con los niveles de aceptación marcados en la norma **UNE-EN ISO 23278**, resultando la prueba satisfactoria.



Figura 22. Probetas sometidas a inspección visual (izqda.) y a inspección magnética (dcha.)

4.6.3 Inspección radiográfica

Para la detección de defectos subsuperficiales en la unión soldada, se llevó a cabo un ensayo radiográfico del cupón de ensayo, ante la imposibilidad de realizar un ensayo ultrasónico – inviable para espesores menores de 8 mm –.

Para este ensayo fue necesaria la intervención de una tercera empresa especializada en ensayos no destructivos, que realizó las radiografías del 100% de la unión del cupón de acuerdo con la norma **ASME Sec. V** y cuyos resultados fueron satisfactorios, según el criterio

de aceptación marcado en la norma **ASME Sec. IX**.

4.7 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Siguiendo la especificación pertinente, se llevaron a cabo todos los ensayos destructivos posibles obteniéndose, en todos ellos, resultados satisfactorios.

4.7.1 Ensayo de impacto. Ensayo Charpy

Debido a la geometría del cupón de ensayo, no fue posible llevar a cabo el ensayo Charpy.

Por indicación del inspector de Bureau Veritas encargado de dirigir los ensayos para la aprobación de la especificación, se sustituyeron los ensayos de impacto por un examen extra de tracción transversal y dos ensayos de doblado.

4.7.2 Ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción transversal se prepararon las probetas de acuerdo a la norma **UNE-EN ISO 4136**.

Además de las dos probetas obligatorias que marcan las normas, se ensayó una tercera con el fin de sustituir el ensayo de impacto.

Recordemos que, para considerar satisfactorio el ensayo, la resistencia a tracción de la probeta ensayada no debe ser inferior al valor mínimo especificado para el metal base. En nuestro caso, al tratarse de un acero inoxidable SuperDúplex EN 1.4501, el límite elástico $R_{p0,2}$ no debe ser inferior a 530 MPa; así como la carga en rotura R_m debe situarse entre 730 y 930 MPa. En la tabla siguiente se recogen los resultados de los ensayos, que figuran en los informes adjuntos a este documento.

Tabla 24. Resultados del ensayo de tracción para la homologación del procedimiento.

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Sección (mm ²)	Módulo elástico (MPa)	Longitud acuerdos (mm)	Límite elástico (MPa) R_{eH}	Carga de rotura $R_{p0,2}$	Longitud inicial (mm) (kN)	Alargamiento (%) (MPa)	Estricción (%)	Zona rotura
T1	6,21	12,11	75,2		76			64,0	851		Weld metal
T2	6,50	12,11	78,7		76			67,2	854		Weld metal
T3	6,40	12,20	78,1		76			65,8	843		Weld metal

4.7.3 Ensayo de doblado

Al igual que el ensayo de tracción transversal, en el ensayo de doblado también se probó un juego adicional de dos probetas, con el fin de sustituir al ensayo de impacto.

Las probetas y los ensayos se llevaron a cabo conforme la norma **UNE-EN ISO 5173** y los requisitos adicionales de la Sociedad de Clasificación. En este caso, por tratarse de probetas de espesor menor de 12 mm, se extrajeron dos probetas para doblado de cara, dos para doblado de raíz y otras dos, las del ensayo extra, para doblado lateral.

A continuación, se muestra una tabla resumen con los resultados de los ensayos. Como se podrá ver en los documentos del Anexo II – Informes , las pruebas resultaron satisfactorias.

Tabla 25. Resultados de los ensayos de doblado de cara, raíz y lateral para la homologación.

Muestra	Localización probeta	Orientación probeta	Tipo de doblado	Dimensiones probeta (l x w x t) (mm)	Diámetro mandrino (mm)	Separación rodillos (mm)	Resultado	Observaciones
FB1		Transversal	TFBB	181 30 7,0	24	42	OK	
FB2		Transversal	TFBB	185 30 7,0	24	42	OK	
RB1		Transversal	TRBB	183 30 7,0	24	42	OK	
RB2		Transversal	TRBB	184 31 7,0	24	42	OK	
SB1		Transversal	SBB	181 7 10,0	24	42	OK	
SB2		Transversal	SBB	184 7 10,0	24	42	OK	

4.7.4 Ensayo de dureza

Se extrajo una probeta para ensayo de dureza Vickers con una carga HV10, de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 9015-1**. En la figura 22 se pueden ver las zonas donde se deben realizar las indentaciones, conforme los requerimientos para este tipo de unión.

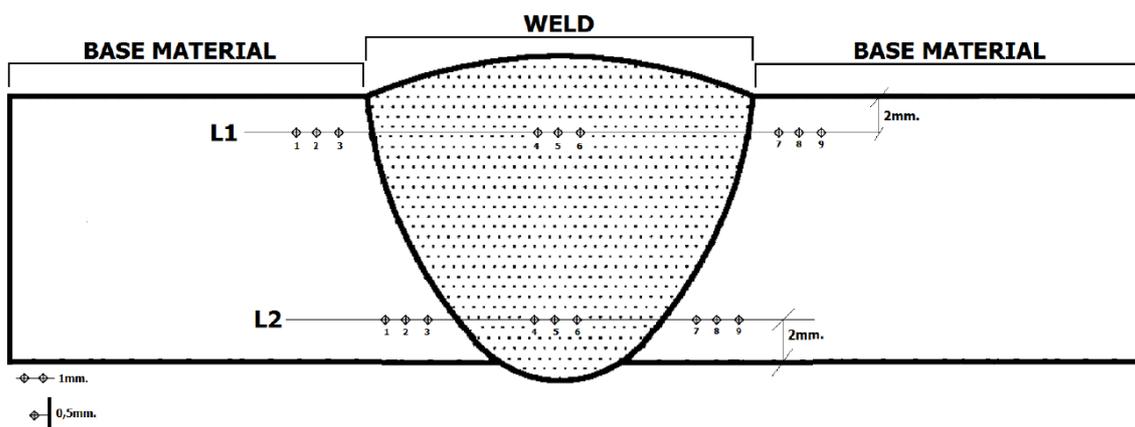


Figura 23. Indentaciones en la probeta de ensayo de dureza.

Como bien comentamos en el apartado de ensayos, el límite máximo de dureza para este tipo de acero – recordemos que se encuadra en el grupo 10 – debe ser especificado antes de la prueba, no estando recogido el límite máximo en ningún documento normativo.

En nuestro caso, antes de proceder con el ensayo, el inspector de la Sociedad de Clasificación estableció el límite en el valor máximo indicado en el certificado de inspección EN 10204:2004/3.1 de la colada del cupón de ensayo: 28 HRC (Dureza Rockwell C)

Los resultados obtenidos de las 18 mediciones arrojan un valor medio de 268 HV10. Teniendo en cuenta que el límite se sitúa en 28 HRC, que es equivalente a 290 HV10, el resultado del ensayo es satisfactorio.

Tabla 26. Resultados del examen de dureza.

SPECIMEN M1					
	IDENTATION	HARDNESS		IDENTATION	HARDNESS
L1	1	269 HV10	L2	1	278 HV10
	2	269 HV10		2	275 HV10
	3	270 HV10		3	275 HV10
	4	269 HV10		4	255 HV10
	5	256 HV10		5	269 HV10
	6	261 HV10		6	257 HV10
	7	271 HV10		7	272 HV10
	8	267 HV10		8	274 HV10
	9	267 HV10		9	275 HV10

4.7.5 Examen macrográfico

El examen macrográfico se realizó conforme la norma **UNE-EN ISO 17639**. Se trata de un examen visual de una sección transversal del cupón de ensayo donde se incluyan el cordón de soldadura, la zona afectada térmicamente y el metal base.

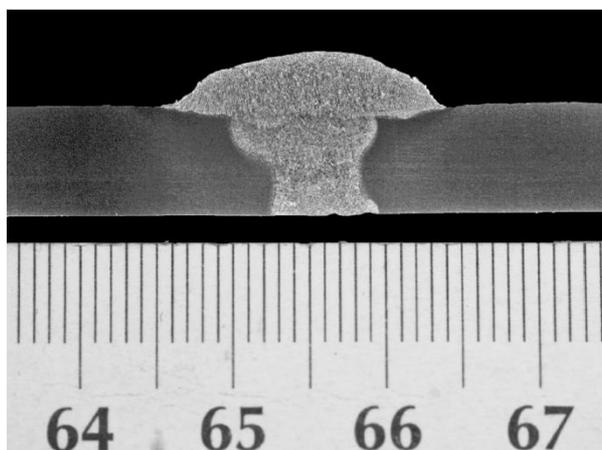


Figura 24. Resultado del ensayo macrográfico.

La muestra fue preparada de acuerdo con los requerimientos de la Clase y atacada a corrosión electrolítica con una disolución de hidróxido de sodio (NaOH) al 20%. La inspección visual de la probeta atacada no reveló defectos, de acuerdo a los niveles de aceptación establecidos en la norma UNE-EN ISO 5817.

5 CONCLUSIONES: WPS

Habiendo obtenido resultados satisfactorios en los ensayos destructivos y no destructivos realizados, se puede concluir que la técnica y los parámetros seguidos durante el registro son válidos para la producción de soldadura. Por lo tanto, tales variables se recogen en nuestra Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS).

En dicho documento, se deben recoger las variables esenciales y no esenciales del procedimiento, así como los rangos de cualificación.

5.1 PROCESO DE SOLDEO

Tras soldar el cupón de ensayo y comprobar que los resultados obtenidos de las pruebas resultaron satisfactorios al 100%, se recogió en la WPS los parámetros establecidos en la especificación preliminar.

Como se estableció durante el registro de cualificación, se soldó el cupón con dos procedimientos distintos y cubriendo espesores determinados: 3 mm de raíz con TIG y los 4 mm restantes con MIG.

De este modo, ateniéndonos a los rangos de espesores cualificados según las Reglas de Clasificación, tendremos cubierto un rango de 2,1 a 6 mm para el proceso TIG y de 3 a 8 mm para el proceso MIG. El desarrollar un procedimiento multiproceso tenía dicha finalidad ya que, con dicha configuración de pasadas de soldeo, obtenemos unos rangos muy versátiles para aplicar en según los requerimientos de la obra. De este modo, con dicho procedimiento podremos – y, de hecho, así se hará – soldar la tubería de Dúplex, de hasta 5 mm de espesor, con semiautomática, ya sea en taller o en campo, y reservaremos el proceso TIG para la construcción de las líneas de SuperDúplex, cuyos requerimientos de calidad son mucho más altos.



Figura 25. Tubo de SuperDúplex soldado con proceso TIG.



Figura 26. Soldadura MIG (izqda.) y tubos conformados con chapa de acero Dúplex (dcha.).

Tras el soldeo del cupón de ensayo y comprobar que los resultados obtenidos fueron satisfactorios, se recogió en la WPS los parámetros establecidos en la especificación preliminar. En la tabla 27 figuran los parámetros principales de soldeo que se han de seguir en la producción.

Tabla 27. Parámetros de soldeo establecidos en la especificación preliminar (pWPS)

Pasada	Proceso	Material de aporte		Corriente			Velocidad de avance (mm/s)	Aporte térmico (kJ/mm)
		Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (A)	Voltaje (V)		
1 – 2	141	ER2594	2	CCPI (E+)	90 – 155	13 – 15	0,78 – 7,75	0,3 – 1,5
3 – n	131	ER2594	1,2	CCPD (E-)	100 – 150	24 – 29	1,6 – 13,53	0,3 – 1,5

5.2 MATERIAL BASE

El acero escogido para la elaboración de los cupones de ensayo (ver apdo. 4.2) fue, recordemos, un acero inoxidable SuperDúplex EN 1.4501 (X2CrNiMoWN25-7-4), perteneciente al grupo de clasificación 10.

Atendiendo a los rangos de cualificación para los grupos y subgrupos de acero que marca la norma **UNE-EN ISO 15614-1:2004** (ver apdo. 0) y las Reglas de Clasificación de Bureau Veritas, la elección de este material para la fabricación de los cupones de ensayo cubre la soldadura de todos los aceros pertenecientes a los subgrupos 10.1 y 10.2, así como la soldadura de los aceros clasificados en los subgrupos 9.2 y 8.2.

5.3 APROBACIÓN

Habiendo cumplido el registro de cualificación todos los ensayos y requisitos expuestos anteriormente, se elaboró la especificación del procedimiento de soldadura de acuerdo a los parámetros que hemos ido comentando.

El procedimiento de soldadura fue aprobado por Bureau Veritas y su puesta en servicio fue inmediata, en la fabricación de más de 15.000 pulgadas de tubería en tres proyectos desarrollados en los 6 meses posteriores.

6 PRESUPUESTO

6.1 OBSERVACIONES GENERALES

El presupuesto que se presenta a continuación ofrece un estudio económico aproximado del desarrollo de este procedimiento.

Se ha de tener en cuenta que, para la ejecución de este proyecto, hay ciertos gastos que no se han imputado directamente, a saber:

- Los gastos generales derivados del uso y consumo de los equipos de corte y soldeo van incluidos dentro del precio total de la partida de *Soldeo del cupón de ensayo*.
- Del mismo modo, el consumo de gas de protección y respaldo que se emplea tanto en el proceso TIG como en el MIG también van incluidos en dicha partida.

Esto se debe a que el coste del equipo empleado va imputado a gastos generales de consumo eléctrico independientes del desarrollo de este procedimiento en cuestión. Por otra parte, el argón de protección y respaldo empleado se obtuvo del stock de gases disponible en el astillero. Por lo tanto, todos estos gastos han sido agrupados en la partida mencionada anteriormente y valorizados como un 20% de los gastos del soldeo del cupón.

Nuestro estudio económico se desglosa en las siguientes partidas:

- Costes de ingeniería.
- Costes del material base.
- Costes del material de aporte.
- Costes de soldeo del cupón de ensayo.
- Costes de ensayos no destructivos.
- Costes de ensayo mecánicos.
- Costes del organismo examinador.
- Costes de elaboración de la documentación de WPS y WPQR.

6.2 PRESUPUESTOS PARCIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA				
Designación	Cantidad	Unidad	Precio unitario, €	Importe, €
Trabajos del departamento de ingeniería para el diseño del procedimiento de soldadura	180	Horas	30,00	5.400,00
			TOTAL DE LA PARTIDA	5.400,00

MATERIAL BASE				
Designación	Cantidad	Unidad	Precio unitario, €	Importe, €
Tubo S/S SuperDúplex EN 1.4501 2 ½" sch. 80S	6,41	Metros	168,77	1.081,82
			TOTAL DE LA PARTIDA	1.081,82

MATERIAL DE APORTE				
Designación	Cantidad	Unidad	Precio unitario, €	Importe, €
Varilla ESAB OK Tigrod 2509, 2,0 mm SuperDúplex	1	Paquete	276,25	276,25
Hilo ESAB OK Autrod 2509, 1,2 mm SuperDúplex	1	Paquete	889,50	889,50
			TOTAL DE LA PARTIDA	1.167,75

SOLDEO DEL CUPÓN DE ENSAYO				
Designación	Cantidad	Unidad	Precio unitario, €	Importe, €
Corte, preparación y soldeo de los cupones de ensayo	18	Horas	20,00	360,00
Gastos generales (uso y consumo del equipo de soldadura, consumo de gas, etc.)				72,00
			TOTAL DE LA PARTIDA	432,00

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS				
Designación	Cantidad	Unidad	Precio unitario, €	Importe, €
Inspección visual de los cupones de prueba	6	Horas	20,00	120,00
Inspección por partículas magnéticas de los cupones de prueba. Mínimo 10 metros.	0,23	Metros	36,00	360,00
Examen radiográfico de los cupones de ensayo: Tubo de 2 ½"	2	Ensayo	366,95	733,90
			TOTAL DE LA PARTIDA	1.213,90

ENSAYOS MECÁNICOS				
Designación	Cantidad	Unidad	Precio unitario, €	Importe, €
Ensayo de tracción transversal (Preparación de probeta y uso y consumo de herramientas y máquinas de ensayo incluidos)	3	Ensayo	53,13	159,39
Ensayo de doblado (Preparación de probeta y uso y consumo de herramientas y máquinas de ensayo incluidos)	6	Ensayo	42,50	255,00
Ensayo de dureza (Preparación de probeta y uso y consumo de herramientas y máquinas de ensayo incluidos)	2	Ensayo	41,93	83,86
Ensayo macrográfico (Preparación de probeta y uso y consumo de herramientas y máquinas de ensayo incluidos)	1	Ensayo	136,00	136,00
			TOTAL DE LA PARTIDA	634,35

ORGANISMO EXAMINADOR				
Designación	Cantidad	Unidad	Precio unitario, €	Importe, €
Presencia del organismo examinador y firma de la documentación necesaria	1	-	1.550,00	1.550,00
			TOTAL DE LA PARTIDA	1.550,00

WPS Y WPQR				
Designación	Cantidad	Unidad	Precio unitario, €	Importe, €
Elaboración de documentos WPS y WPQR	20	Horas	30,00	600,00
			TOTAL DE LA PARTIDA	600,00

6.3 PRESUPUESTO TOTAL

PRESUPUESTO	
Partida	Importe, €
Departamento de ingeniería	5.400,00
Material base	1.081,82
Material de aporte	1.167,75
Soldeo del cupón de ensayo	432,00
Ensayos no destructivos	1.213,90
Ensayos mecánicos	634,35
Organismo examinador	1.550,00
WPS y WPQR	600,00
TOTAL	12.079,82

El presupuesto total asciende a doce mil setenta y nueve euros con ochenta y dos céntimos.

Santander, septiembre de 2016



CAMILO A. GONZÁLEZ JARA

7 ANEXOS

7.1 ANEXO I – FORMATO DE WPQR Y WPS

A continuación, se muestran los documentos aprobados del Registro de Cualificación del Procedimiento de Soldadura (WPQR) y de la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS).

Estos documentos, como ya se comentó anteriormente, recogen los resultados de los ensayos realizados al cupón de prueba y las variables esenciales y no esenciales de soldeo.

ASTANDER Av. Fernández Hontoria, 24 39007, El Astillero (España)		HOMOLOGACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA				CÓDIGO: SP-05/Anexo B						
		REGISTRO DE PRUEBA PQR				Pág. Nº 1/2						
		WELDING PROCEDURE QUALIFICATION RECORD (WPQR)				ÚLTIMA REVISIÓN: 31-10-11						
PQR Nº		WPQR AST07		Rev. Nº		WPS Nº		WPS AST07				
Qualification in accordance with: <u>UNE-EN ISO 15614-1:2005; UNE-EN ISO 15609-1:2005; Bureau Veritas Rule Note NR 216 DT R07 E</u> Cualificación de acuerdo con:												
Welding process(es): Proceso(s) de soldadura:		<u>TIG (141) + MIG (131)</u>				Joint design type Diseño de junta		<u>BW V60°</u>				
Type Tipo		<u>MANUAL + SEMI-AUTOMATIC</u>				Position Posición		<u>H-L045 (60)</u>				
BASE METAL Metal base					TECHNIQUE Técnica							
Base metal Metal base		<u>IN LAIN (NUMBER DUPLEX - DUPLEX STAINL)</u> <u>USE STEEL</u>				String or Weave bead Cordón recto u oscilante		<u>WEAVE</u>				
Thickness Espesor		<u>7,2 mm</u>				Method of back gauging Método de resanado		<u>GRINDING</u>				
Diameter Diámetro		<u>73 mm</u>				Single or Multiple pass Pasada simple o múltiple		<u>MULTIPLE</u>				
JOINT DESIGN Diseño de junta					WELDING SEQUENCE Secuencia de soldo							
PREHEAT Pre calentamiento					FILLER METAL Metal de aporte							
Preheat Temperature Temperatura de precalentamiento		<u>ROOM TEMPERATURE</u>			AWS Specification: Especificación AWS:		<u>ER2594</u>					
Max. Interpass Temperature Máxima temperatura entre pasadas		<u>150 °c</u>			SFA Specification: Especificación SFA:		<u>N/A</u>					
POST-WELD HEAT TREATMENT Tratamiento térmico post-soldo					AWS Classification Clasificación AWS:							
Temperature range Rango de temperatura		<u>N/A</u>			<u>AWS A5.9</u>							
Time range Rango de tiempo		<u>N/A</u>										
Run Pasada	Process Proceso	Position Posición	Electrode / wire Electrodo / hilo				Gas		Amp. (A)	Volt. (V)	Travel speed	Heat input
			Trade name Nombre comercial	Class Clase	Diameter Diámetro	Type and polarity Tipo y polaridad	Flow rate shielding	Flow rate backing				
1 - 2	141	6G	ESAB OK Tigrod 2509	ER2594	2	DC E+	6	20	108	15	3,12	0,52
3	131	6G	ESAB OK Autrod 2509	ER2594	1,2	DC E-	6		127	28	4	0,83
4 - n	131	6G	ESAB OK Autrod 2509	ER2594	1,2	DC E-	6		130	29	4,2	0,90

ASTANDER Av. Fernández Hontoria, 24 35007, El Astillero (España)	HOMOLOGACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA		CÓDIGO: SP-05/Anexo B				
	REGISTRO DE PRUEBA PQR		Pág. N° 2/2				
	WELDING PROCEDURE QUALIFICATION RECORD (WPQR)		ÚLTIMA REVISIÓN: 31-10-11				
PQR N°	WPQR AST07	Rev. N°	WPS N°	AST07			
VISUAL INSPECT -MAGNETIC PARTICLES & DYE PENET. EXAM.- Inspección visual -examen por partículas magnéticas y líquidos penetrantes		RADIOGRAPHIC ULTRASONIC EXAMINATION EXAMEN RADIOGRAFICO-ULTRASONIDOS					
VI report: Informe IV	SP-03 ANEXO A	Result: Resultado	SATISFACTORY	UT report: Informe UT	N/A	Result: Resultado	N/A
MPI report: Informe PM	SP-02 ANEXO A	Result: Resultado	SATISFACTORY	RX report: Informe RX	RT-14.022.0019.020	Result: Resultado	SATISFACTORY
DYE PEN. Report: Informe PM	N/A	Result: Resultado	N/A	RX report: Informe RX	RT-14.022.0019.020 (extra test)	Result: Resultado	SATISFACTORY
TENSILE TEST Ensayo de tracción							
Specimen N° N° de probeta	Width Anchura	Thickness Espesor	Area Área	Ultimate tensile load Carga máxima	Ultimate unit stress Carga de rotura	Character of failure and location Tipo de fractura y localización	
T1	12,11 mm	6,21 mm	76,2 mm ²	> 530	551 MPA	WELD METAL	
T2	12,11 mm	6,50 mm	76,7 mm ²	> 530	554 MPA	WELD METAL	
T3 (extra test)	12,20 mm	6,40 mm	76,1 mm ²	> 530	543 MPA	WELD METAL	
GUIDE BEND TEST Prueba de plegado							
Specimen N° N° de probeta	Type of bend Tipo de plegado	Results Resultados	Remarks Observaciones	Specimen N° N° de probeta	Type of bend Tipo de plegado	Results Resultados	Remarks Observaciones
FB1	TFBB	O.K.					
FB2	TFBB	O.K.					
RB1	TRBB	O.K.					
RB2	TRBB	O.K.					
SB1	SBB	O.K.	Extra test				
SB2	SBB	O.K.	Extra test				
CHARPY V-NOTCH IMPACT TEST Ensayo Charpy de impacto							
	Weld metal Metal soldado	Fusion line Línea de fusión	Fusion line +2 mm Línea de fusión +2 mm	Fusion line +5 mm Línea de fusión +5 mm			
NOT ENOUGH THICKNESS. EXTRA TENSILE, BEND AND RX TESTS INSTEAD							
MAX. MATERIAL THICKNESS LIMITED TO 12 mm							
Test temperature Temperatura de ensayo				Values in Valores en			
N/A				N/A			
HARDNESS TEST Ensayo de dureza				MACRO SECTION TEST Macrografía			
Type Tipo	VICKERS			Result Resultado	SATISFACTORY		
Result Resultado	SATISFACTORY						
WELDER DATA Datos del soldador				Test conducted by Test dirigido por			
Nombre Name	DAVID GOMEZ						
Number N°							
We, the undersigned, certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded and tested in accordance with the requirements of UNE-EN ISO 15614-1, UNE-EN ISO 15609 and Bureau Veritas Rule Note NR 216 DT R07 E.							
Los abajo firmantes certificamos que todos los datos son correctos y que todas las muestras han sido preparadas, soldadas y ensayadas de acuerdo con las exigencias de la norma UNE-EN ISO 15614-1, UNE-EN ISO 15609 y la norma de Bureau Veritas NR 216 DT R07 E.							
ASTANDER		Classification Society Sociedad de Clasificación		Otros Other			
Name and sign Nombre y firma		Name and sign Nombre y firma		Name and sign Nombre y firma			
Date: Fecha:		Date: Fecha:		Date: Fecha:			

ASTANDER Av. Fernandez Hontoria, 24 39007, El Astillero (España)	HOMOLOGACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA		CÓDIGO: SP-05/Anexo A	
	ESPECIFICACIÓN PROCEDIMIENTO SOLDADURA		Pág. Nº 1/2	
	WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) (See LINE EN ISO 15609-1:2005, 15614-1:2005 Y BV RULES)		ÚLTIMA REVISIÓN: 31-10-11	
Company	ASTANDER S.A.	By	DAVID ARENAL	
Empresa		Por		
Welding Procedure Specification Nº	WPS AST07	Date	18/08/2014	
Nº Especificación Procedimiento Soldadura		Fecha		
Supporting PQR Nº	WPQR AST07			
Nº PQR				
Revision Number		Date		
Revisión Nº		Fecha		
Welding Process(es)	TIG (141) + MIG (131)	Type (s)	MANUAL + SEMI-AUTOMATIC	
Proceso(s) de soldadura		Tipo (s)		
JOINTS				
Detalles de la preparación de soldadura				
Joint Design	See sketch (BW Pipe)			
Diseño de la unión				
Backing	NO (TIG); YES (MIG)			
Respaldo				
Backing material (Type)	N/A			
Material de respaldo (Tipo)				
Root spacing	N/A			
Separador en raíz				
Retainer	N/A		Retainer material (type)	N/A
Retenedor			Material de retenedor (tipo)	
BASE METAL				
Metal base				
Group of base material:	10.2	Other:	8 (8.2); 9 (9.2); 10 (10.1, 10.2)	
Grupo de material base		Otros:	DUPLIX AND SUPER DUPLEX STEEL	
Specification type and grade	EN LAMP (SUPER DUPLEX - DUPLEX STEEL)			
Especificación de materiales, tipo y grado	UNS S32700			
to specification type and grade	EN LAMP (SUPER DUPLEX - DUPLEX STEEL)			
a especificación de material, tipo y grado	UNS S32700			
Thickness Range:	AS PER FILLER METALS THICKNESS RANGE			
Rango de espesor:				
Base metal: Groove	N/A		Filet	N/A
Metal base: En chafén			En ángulo	
Deposited Weld Metal	N/A		Other	N/A
Metal depositado			Otros	
Pipe Dia. Range:	Plate & Pipe D > 38,5 mm		Groove	N/A
Rango de diámetro de tubería:			En chafén	Filet N/A
Mx. Thickness pass	N/A		En ángulo	
Espesor de pasada máximo				
FILLER METALS				
Materiales de aportación				
Designation:	ER2594 (TIG - 141)	ER2594 (MIG - 131)	Other	
Designación			Otros	
Specification:	N/A			
Especificación				
Size of filler metals	TIG (141): 2 mm	MIG (131): 1,2 mm		
Diámetro del metal de aporte				
Electrode-Flux (Class)	N/A	AWS (Class)	AWS A5.9	
Electrodo-Flux (Clase)		Clasif. (AWS)		
Flux Trade Name	N/A	Alloy flux	N/A	
Marca comercial del Flux		Flux aleado		
Consumable insert	N/A	Type	N/A	
Anillo consumible		Tipo		
Supplementary filler metal (type)	N/A	Recrushed slag	N/A	
Metal de aporte suplementario (tipo)		Escoria triturada		
Thickness range (mm)	TIG (141): 2,1 - 6			
Rango de espesor (mm)	MIG (131): 3 - 8,2			
POSITIONS				
Posiciones				
Positions of Groove	H-L045 (8G)			
Posiciones de la unión				
Welding Progression:	N/A	Up	X	Down
Progresión de soldo		Ascendente		Descendente
Position (s) of fillet	N/A			
Posición (as) en ángulo				

ASTANDER Av. Fernández Hontoria, 24 39007, El Astillero (España)		HOMOLOGACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA				CÓDIGO: SP-05/Anexo A							
		ESPECIFICACIÓN PROCEDIMIENTO SOLDADURA				Pág. Nº 2/2							
		WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) (See UNE EN ISO 15609-1:2005, 15614-1:2005 & BV RULES)				ÚLTIMA REVISIÓN: 31-10-11							
PREHEAT Precalentamiento Preheat Temp. Min. Temp. Min. Precalentamiento Interpass Temp. Max. Temp. Max. Entre pasadas Preheat maintenance Temp. Mantenimiento Precalent.			ROOM TEMPERATURE ROOM TEMPERATURE 150 °C ROOM TEMPERATURE		POSTWELD TREATMENT Tratamiento térmico post-soldado Temperature Range Rango temperatura Time Range Rango de tiempo Other Otros		N/A N/A N/A N/A						
GAS Gas Shielding Gas(es) Gas(es) de protección Backing Gas(es) Gas(es) de respaldo Percent Composition (mixtures) Porcentaje composición de la mezcla			99,99% Ar 99,99% Ar N/A		Flow rate (Shielding) Caudal Flow rate (Backing) Caudal Trailing Gas Gas de protección adicional		5 - 8 l/min 18 - 22 l/min N/A						
ELECTRICAL CHARACTERISTICS Características eléctricas Current AC or DC Corriente alterna o continua Amperage (Range) Amperaje (Rango) Mode of Metal Transfer for GMAW Transferencia del metal en GMAW Electrode Wire feed speed range Rango de velocidad de salida del hilo								DC TIG (141): 90 - 155 MIG (131): 100 - 150 Pulsed arc		Polarity Polaridad Volta (Range) Voltaje (Rango) Tungsten Electrode Size and Type Tamaño y tipo de electrodo tungsteno Pulsing Current Corriente Pulsada		TIG (141): ELECTRODE (+) MIG (131): ELECTRODE (-) TIG (141): 13 - 15 MIG (131): 24 - 29 2 mm (W+ 2%Th) YES	
TECHNIQUE Técnica String or Weave Bead Cordón recto u ondulado Orifice or Gas cup size Diámetro boquilla de gas Method of back gouging Método de resanado Contact tube to work distance Distancia de tubo de contacto a pieza Multiple or single electrodes Electrodo múltiple o simple Travel speed range Rango de velocidad de avance Other Otros								WEAVE N/A GRINDING TIG (141): 1,5 mm MIG (131): 10 - 15 mm SINGLE		Oscillation Oscilación Initial and interpass cleaning Limpieza inicial y entre pasadas Closed/out chamber Cámara cerrada/abierto Multiple or single pass (per side) Pasada múltiple o simple Electrode spacing Separación de electrodos Peening Martillado		YES YES CLOSED MULTIPLE NO NO	
Run	Process	Filler Metal		Current			Travel Speed	Heat Input					
Pasada	Proceso	Metal de Aporte		Corriente			Rango de velocidad de Avance	Aporte Térmico					
		Class	Diameter (mm)	Type and polarity	Amp. Range (A)	Vol. Range (V)	Rango de velocidad de Avance (mm/s)	Aporte Térmico (kJ/mm)					
		Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (A)	Voltaje (V)							
1 - 2	141	ER2594	2	DC E+	90 - 155	13 - 15	0,78 - 7,75	0,3 - 1,5					
3	131	ER2594	1,2	DC E-	100 - 150	24 - 29	1,6 - 13,53	0,3 - 1,5					
4 - n	131	ER2594	1,2	DC E-	100 - 150	24 - 29	1,6 - 13,53	0,3 - 1,5					
ASTANDER		Classification Society				Other							
		Sociedad de Clasificación				Other							
Name and sign		Name and sign				Name and sign							
Nombre y firma		Nombre y firma				Nombre y firma							
Date:		Date:				Date:							
Fecha:		Fecha:				Fecha:							

7.2 ANEXO II – INFORMES DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DESTRUCTIVOS

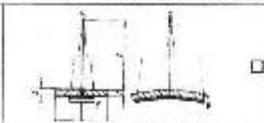
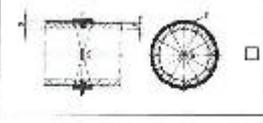
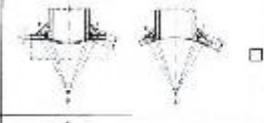
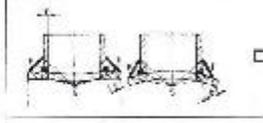
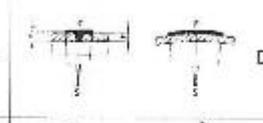
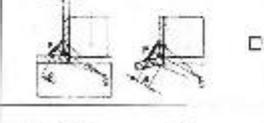
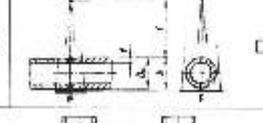
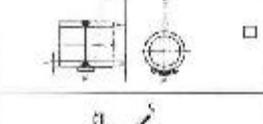
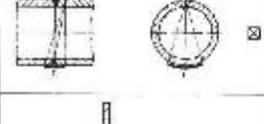
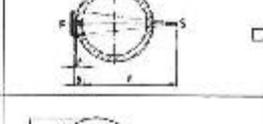
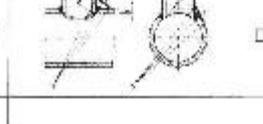
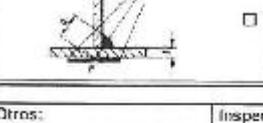
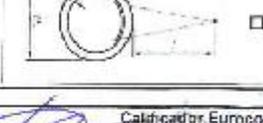
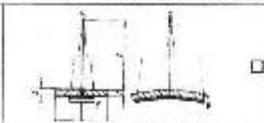
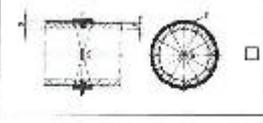
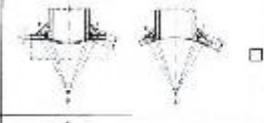
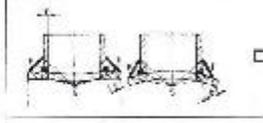
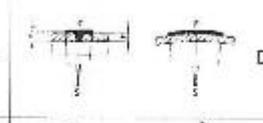
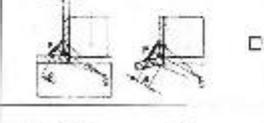
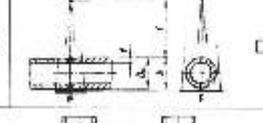
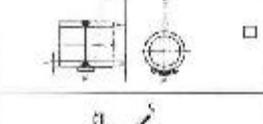
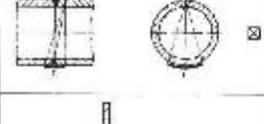
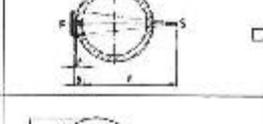
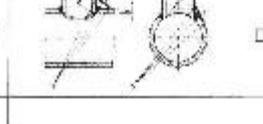
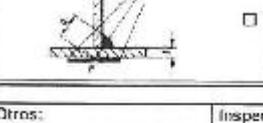
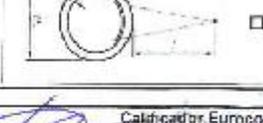
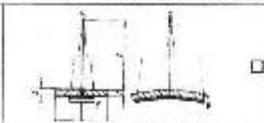
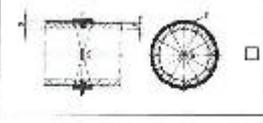
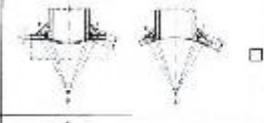
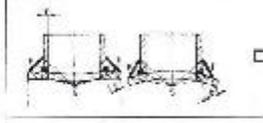
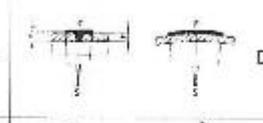
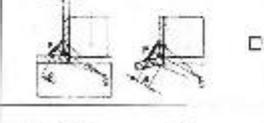
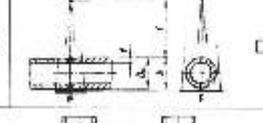
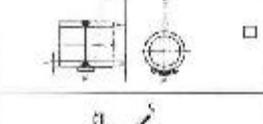
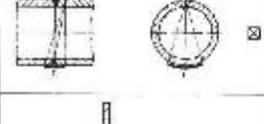
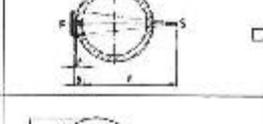
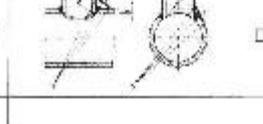
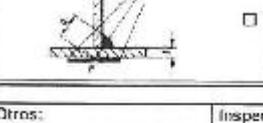
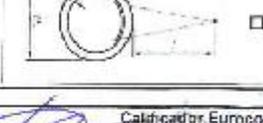
En este anexo encontramos los informes de los ensayos no destructivos y destructivos realizados a las probetas del cupón de ensayo.

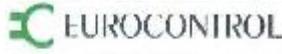
En este anexo figuran, por orden, los siguientes informes:

- Informe de inspección visual.
- Informe de inspección por partículas magnéticas.
- Informe de examen radiográfico, realizado por Eurocontrol S.L.
- Informe de ensayo de tracción transversal, realizado por ENSA.
- Informe de ensayo de plegado, realizado por ENSA.
- Informe de ensayo de dureza, realizado por ENSA.
- Informe de ensayo macrográfico, realizado por ENSA.

ASTANDER		INSPECCION VISUAL				CÓDIGO: 8P-03/Anexo A	
		INSPECCIÓN VISUAL				Pág. N° 1/1	
		VISUAL INSPECTION				ÚLTIMA REVISIÓN: 31/10/2011	
BUQUE / SHIP:	PROCEDIMIENTO SUPERDÚPLEX	BIS N° / ITEM N°:	8716	OBRA N° / JOB N°:	8678		
Emitido por / Issued by:	Quality Control		Fecha / Date:	19/08/2014			
Inspeccionado en / Checked in:	A flote / Floating		Dique / Drydock		Taller / Workshop	X	
PRODUCTO O ELEMENTO / ITEM: <p style="text-align: center;">CUPONES DE ENSAYO PARA PROCEDIMIENTO SUPERDÚPLEX Inspección visual de dos cupones de ensayo para cualificación de procedimiento de soldadura. Dos cupones de ensayo de tubos SuperDúplex EN 1.4501 soldados con TIG y MIG. Soldado por David Gómez.</p>							
RESULTADO DE LA INSPECCIÓN / CHECKING RESULT: <p style="text-align: center;">SATISFACTORY</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>							
TRATAMIENTO REQUERIDO NON CONFORMITY REVIEW AND DISPOSITION							
TRATAMIENTO DISPOSITION		DISCONFORMIDADES NON CONFORMITY			OTROS OTHER		
Aceptar con reparación Acceptance with repairs		N/A			N/A		
Aceptar sin reparación Acceptance without repairs:		N/A			N/A		
Reclasificar a otras aplicaciones Reclassified for other applications		N/A			N/A		
Rechazar definitivamente Definitively rejected		N/A			N/A		
	S. CLASIFICACIÓN CLASS. SOCIETY	OTROS OTHER	ARMADOR OWNER	CONTROL CALIDAD QUALITY CONTROL	ASTANDER		
VERIFICADO POR LOS SEÑES: CHECKED BY:							
FIRMAS DE APROBACION SIGNINGS OF APPROVAL							
REPARACIONES ADOPTADAS REPAIRS CARRIED OUT			OBSERVACIONES REMARKS				
APROBACIONES AL TRATAMIENTO Y REPARACIONES ACCEPTANCE NON CONFORMITY	S. CLASIFICACIÓN CLASS. SOCIETY	OTROS OTHER	ARMADOR OWNER	CONTROL CALIDAD QUALITY CONTROL	ASTANDER		
							
	Nombre y firma Name and sign	Nombre y firma Name and sign	Nombre y firma Name and sign	Nombre y firma Name and sign	Nombre y firma Name and sign		
	Fecha / Date	Fecha / Date	Fecha / Date	Fecha / Date	Fecha / Date		

ASTANDER	INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS		CÓDIGO: SP-02/Anexo A
			Pag. N° 1/1
	INFORME DE VERIFICACIÓN EXAMINATION REPORT		ÚLTIMA REVISIÓN: 31/10/2011
IDENTIFICACIÓN DEL BUQUE Ship Identification			
NOMBRE DEL BUQUE: Ship name:	PROCEDIMIENTO SUPERDÚPLEX		
OBRA: Job:	6578	BIS: Item:	6715
CONDICIONES DE LA VERIFICACIÓN Conditions of the examination			
ELEMENTO VERIFICADO: Examined element:	CUPONES DE ENSAYO PARA PROCEDIMIENTO SUPERDÚPLEX		
LUGAR DE VERIFICACIÓN: Place of examination:	TALLER		
DOCUMENTOS, PLANOS: Documents, drawings:	BV - NR 216, Ch. 5, Sec. 4		
PRODUCTOS Y EQUIPO UTILIZADOS Products and equipment used			
EQUIPO: Equipment:	ELECTROMAGNETIC YUGO Y-6		
PARTÍCULAS USADAS: Particles:	ARDROX 8901W ARDROX 800/3		
RESULTADO DE LA VERIFICACIÓN: Inspection result:	SATISFACTORIO		
OBSERVACIONES: Remarks:			
VERIFICADO / Examined Nivel II / Level II David Arenal Ruiz 	SUPERVISADO / Supervised Nivel II / Level II David Arenal Ruiz 	OTROS / Other	
FECHA / Date:	FECHA / Date:	FECHA / Date:	

 <p>INFORME DE EXAMEN RADIOGRÁFICO DE SOLDADURAS RADIOGRAPHIC EXAMINATION REPORT FOR WELDS</p>		Informe N°: RT-14-022-0018-0025 Rev: 00 Report N°: RT-14-022-0018-0025 Rev: 00																					
Fecha examen: 19-01-2014 Hoja: 1 de 3 Exam. Date: 19-01-2014 Sheet: 1 of 3		Cliente: ASTANDER Customer: ASTANDER																					
Dirección Cliente: CHIMBOTE, PUNTA A LA OLA 3050 EL ESTABLO 9, CHIMBOTE Customer Address: CHIMBOTE, PUNTA A LA OLA 3050 EL ESTABLO 9, CHIMBOTE		Lugar examen: INSTA. ANOMES EUROCONTROL Exam. Place: EUROCONTROL																					
Obra: HOMOLOGACION DAVID GOMEZ (I) Job: DAVID GOMEZ (I)		N° Contrato: N/A Purchase Order: N/A																					
Proc. Examen: LCH-1 AS SOL 08 Rev. 04 Ex. procedure: LCH-1 AS SOL 08 Rev. 04	Norma examen: ASME Sec. IX Ed. 2013 Exam. Standard: ASME Sec. IX Ed. 2013	Nivel examen: N/A Exam. level: N/A	Norma Aceptación: ASME Sec. IX Ed. 2013 Accep. Standard: ASME Sec. IX Ed. 2013																				
Nivel aceptación: N/A Acceptance level: N/A	*Ref. Item examinado: TURBINA 219 Sdt. 80 Examined Ref. Item: TURBINA 219 Sdt. 80	*Plano: N/A Drawing: N/A	*Material: SUPER DUXIFLEX Material: SUPER DUXIFLEX																				
*Geometría de Unión: SOLDADURA CON PREPARACION TOTAL CON PREPARACION DE BORDOS EN Y Joint Geometry: SOLDADURA CON PREPARACION TOTAL CON PREPARACION DE BORDOS EN Y	*Proceso de soldadura: GTAW Welding Process: GTAW	*Trat. Térmico: Sin TT / No RT Heat Treatment: Sin TT / No RT	*PFA/Op: N/A App. Op: N/A																				
*Estado superficial: Amolado / Grinded Surface condition: Amolado / Grinded	*Extensión: 100 % Extension: 100 %	*Mecanizado / Mached: <input type="checkbox"/>	*Mecanizado / Mached: <input type="checkbox"/>																				
Fuente radiográfica: 02-02 RA-089 Radiograph source: 02-02 RA-089	Tamaño Fuente (mm): 63.124 Source size (mm): 63.124	Actividad rayos Gamma: 0.0 Gamma ray activity: 0.0	Ajustes rayos X: N/A Kv mA X-ray adjust: N/A Kv mA																				
Tiempo de Exposición: 150" Exposure time: 150"	Película: KODACK CONTACRAN Tipo: IAX-125 Film: KODACK CONTACRAN Type: IAX-125	Clase sistema película: F10 System Class: -- Tamaño: 170x130 mm Size: 170x130 mm	Exposición: <input checked="" type="checkbox"/> Simple Film / Interpretación: <input checked="" type="checkbox"/> Simple Film <input type="checkbox"/> Doble Film / Interpretación: <input type="checkbox"/> Doble Film																				
Pantallas: Pb Screens: Pb	Espesor Anterior: 0.027 mm Anterior thickness: 0.027 mm	Esp. Posterior: 0.027 mm Posterior thickness: 0.027 mm	Esp. Intermedio: N/A Intermediate thickness: N/A																				
Revelado: <input checked="" type="checkbox"/> Automático / Automatic Developing: <input checked="" type="checkbox"/> Automático / Automatic	Color: 8' Cx/v 25°C	Tipo Indicador de calidad imagen: WHH Designación: ASTM D5818/2001 1 A / C Image quality indicator type: WHH Designation: ASTM D5818/2001 1 A / C																					
Situación: <input type="checkbox"/> Lado Fuente / Source side Situation: <input checked="" type="checkbox"/> Lado Película / Film side <input type="checkbox"/> Ambos Lados / Both sides	Galga: <input type="checkbox"/> Si / Yes Gauge: <input checked="" type="checkbox"/> No / No	Espesor / Thick:	Penumbra: 0.33 Unsharpness: 0.33																				
Densitómetro: 39-11-262 Densitometer: 39-11-262	<input checked="" type="checkbox"/> Densitómetro verificado Densitometer verified: <input checked="" type="checkbox"/> Densitómetro verificado	Regilla densidades para verificación: 39-11-262 Density strip for verification: 39-11-262	Procesadora: 39-11-270 Developer: 39-11-270																				
Negoscopio: 39-11-207 Magnifying glass: 39-11-207	*Gauge procedure used per the client is not verified by the laboratory / Date provided by the customer is not verified by the laboratory																						
Técnica Radiográfica / Radiographic Technique																							
<table border="1" style="width: 100%; height: 150px;"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>																							
																							
																							
																							
																							
																							
Otros: Others:	Inspector Autorizado: Authorized inspector:	Cliente: Customer:	Calificador Eurocontrol: Eurocontrol Classifier:																				
Fecha: Date:	Fecha: Date:	Fecha: Date:	Fecha Informe: Report Date:																				
Operador Eurocontrol: Eurocontrol Operator:	Eduardo Agüero Tirador Nivel: II / Level: II	Operador Eurocontrol: Eurocontrol Operator:	Eduardo Agüero Tirador Nivel: II / Level: II																				
Fecha Informe: Report Date: 19.05.2014	Fecha Informe: Report Date: 19.05.2014	Fecha Informe: Report Date: 19.05.2014	Fecha Informe: Report Date: 19.05.2014																				

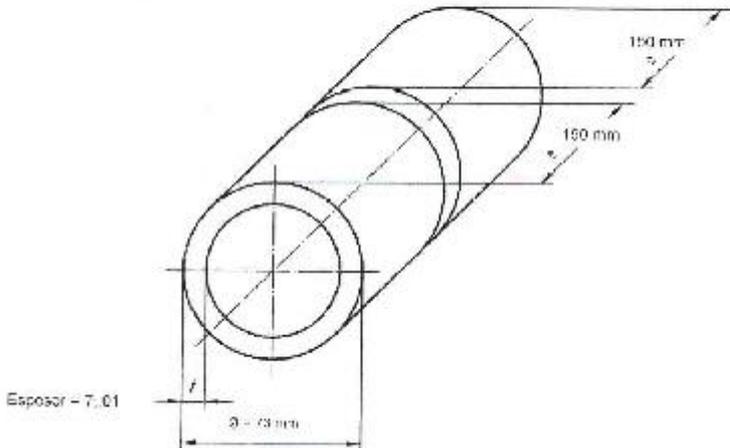
 <p> Laboratorio de Control de Calidad Centro de Inspección Físico de Calidad Ciudad: 11400-28110 Seaside, CO. R.L.L. S. Phone: 942 225 566 - Fax: 942 225 506 e-mail: info@eurocontrol.com </p>		<p align="center"> INFORME DE EXAMEN RADIOGRÁFICO DE SOLDADURAS RADIOGRAPHIC EXAMINATION REPORT FOR WELDS </p>		Informe Nº: RT-14-022-0018-0025 Rev: 00 Report Nº:																			
Fecha examen: 19.08.2014 Exam. Date:		Hoja: 2 de 2 Sheet: of		Cliente: ASTANDER Customer:																			
Dirección Cliente: REPARACIONES HORTERA, S. de CV. S. de CV. Customer Address:		Lugar examen: INSTALACIONES LUXCONTROL Examination place:		*Obrero: DAVID GOMEZ (1) Job:																			
*Nº Contrato: N/A Purchase Order:																							
RESULTADOS / RESULTS																							
Identificación / Identification	*Soldador / Welder	Sector / Sector	Densidad / Density	Espesor / Thickness (mm) / U.C.I. / U.C.I.					FFD (mm)	d (mm)	b (mm)	Defectos / Defects										Calificación / Classification	
				Base	Solda.	Refuc.	Req.	Obj.				a	b	c	d	e	f	g	h	i	j		k
DAVID GOMEZ (1)	D.G.	(1-1)	2-1-4	7.01	10.01	2-1	W-3	W-3	73.0	55.0	7.01	X											A
		(1-2)	2-1-4	7.01	10.01	2-1	W-3	W-3	73.0	55.0	7.01												A
		(2-0)	2-1-4	7.01	10.01	2-1	W-3	W-3	73.0	55.0	7.01	X											A
RECEIVED / RECIBIDO																							
Leyenda / Acronyms																							
FFD	Distancia fuente película / Source to film distance		d	Mínima distancia fuente objeto / Minimum source-to-object dist.		b	Distancia desde el lado fuente del objeto a la película a la mínima distancia fuente objeto / Distance from source side of object to film at the minimum source-to-object distance																
Aa	Densidad / Density	Ba	Escamas aisladas / Isolated slag		C	Falta de fusión / Lack of fusion		Ea	Grieta longitudinal / Longitudinal crack		F	Weldcracks / Unbeccus		G	Grietas / Cracks								
Ab	Puntos arrastrados / Abrasions		Bb	Escamas adheridas / Adhered slag		D	Falta de penetración / Lack of penetration		Eb	Grieta transversal / Transversal crack		K	Replages / Slumpages		D	Derecho de film / Film defect							
Calificación / Qualifier	A		Aceptada / Accepted		R	Rechazada / Rejected		RF	Repelir placa / Repeel film														
NOTAS / REMARKS:																							
1. 2. 3. 4. 5.																							
Otros / Others		Inspector Autorizado / Authorized inspector:			Cliente / Customer:			Calificador Eurocontrol / Eurocontrol Classifier:			Operador Eurocontrol / Eurocontrol Operator:												
																							
Fecha / Date:		Fecha / Date:			Fecha / Date:			Fecha Informe / Report Date:			Fecha Informe / Report Date:												
		19/08/2014			19/08/2014			19-08-2014			19-08-2014												
Eurocontrol es un proveedor de servicios de inspección de calidad independiente de cualquier actividad industrial. / Eurocontrol is an independent provider of quality inspection services for any industrial activity.																							

 EUROCONTROL División Laboral Calle de Arzobispo Pol. Ind. de Quintos 72 Madrid 28011 - España Tlf: +34 91 562 362 - Fax: +34 91 562 365 www.eurocontrol.es	INFORME DE EXAMEN RADIOGRÁFICO DE SOLDADURAS RADIOGRAPHIC EXAMINATION REPORT FOR WELDS		Informe Nº: Report Nº:	R1 - 14 022 0015 0025	Rev: 00	
	Fecha examen: Exam. Date:	19.01.2014	Hoja: Sheet:	2	de of	2
	Cliente: Customer:	ASTANDER				

Dirección Cliente: Customer Address:	RETRADERS COMERCIAL SA R. ANA 1 1001 - 02002 ARSA	Lugar examen: Examination place:	INSTALACIONES LLETRON TRUL	*Obr: Job:	HOMOLOGACION DAVID GOMEZ (1)	*Nº Contrato: Purchase Order:	V/A
---	--	-------------------------------------	-------------------------------	---------------	---------------------------------	----------------------------------	-----

Croquis / Sketch:

***PROBETA DE SOLDADURA DIVIDIDA EN 3 SECTORES DE LONGITUD SIMILAR PARTIENDO DE LA REFERENCIA MARCADA. IDENTIFICACIÓN DE SECTORES MARCADOS PERMANENTEMENTE SOBRE PROBETA.**



Espesor = 7.01
Ø = 73 mm

Otros: Others:	Inspector Autorizado: Authorized inspector:	Cliente: Customer:	Calificador Eurocontrol: Eurocontrol Qualifier:	Operador Eurocontrol: Eurocontrol Operator:
				
Fecha: Date:	Fecha: Date:	Fecha: Date:	Fecha Informe: Report Date:	Fecha Informe: Report Date:
			19.01.2014	19.01.2014



Los ensayos realizados (1) no están cubiertos por la acreditación de ENAC / (1) are not covered by ENAC accreditation

INFORME DE ENSAYO DE TRACCIÓN
TENSILE TEST REPORT



Report to client S.A. Of José Olayo 1000 - Pinar del Río - Cuba
Tel: 051 200 100 1000 - Fax: 051 200 100 1000

Pedido / Job n°:	Telefónico	Norma Ensayo / Standard:	UNE EN ISO 6892-1:2010 B
Nº Cupón / Coupon n°:	Tube DG	Nº Máquina / Machine n°:	0400-0229
Material / Material (1):	Superduplex	Fecha Recepción / Reception date:	28/08/2014
Coleta / Heat (1):	Not applicable	Fecha Ensayo / Test date:	29/08/2014
Especificación / Specification:	NR 216, Ch 5, Sec 4	Procedimiento de Ensayo / Test procedure:	PE-LM-LE 01 R4
Temperatura Ensayo / Test Temperature:	23°C ± 5 °C		

Velocidad Ensayo / Speed Test: 6,0 (MPa/s) Z. Elástica / Elastic z. 0,6 (%/s) Z. Plástica / Plastic z.

Muestra / Specimen	Espesor / Thickness (mm)	Ancho / Width (mm)	Área / Area (mm²)	Módulo Elástico / Young Modulus (MPa)	Longitud acortada / Long. rebar. section Lc (mm)	Límite Elástico (MPa) / Yield strength		Carga de Rotura / Tensile strength (kN)	Elongación / Elongation (%)	Alargamiento / Prolongation (%)	Reducción de Área / Reduction area (%)	Zona Rotura / Location of break
						Superior R _{0.2}	Conv. R _{0.2}					
T1	0,21	12,11	76,2		70		84,0	851				Weld metal
T2	0,50	12,11	78,7		70		87,2	854				Weld metal
T3	0,40	12,20	78,1		70		85,8	843				Weld metal

Muestra / Specimen	Incertidumbre Sección Área / Uncertainty Area (mm²)	Incertidumbre Límite Elástico (MPa) / Yield strength Uncertainty		Incertidumbre Carga de Rotura / Tensile strength uncertainty (kN)	Incertidumbre Alargamiento / Prolongation Uncertainty (%)	Incertidumbre Reducción de Área / Reduction area Uncertainty (%)
		Superior R _{0.2}	Conv. R _{0.2}			
T1	0,8			16		
T2	0,8			16		
T3	0,8			16		

Observaciones / General Remarks

Preparado por / Prepared by
Cristina Abascal
Analista Laboratorio de Ensayos /
Laboratory Test Analyst

Las incertidumbres recogidas en el presente informe se han calculado con un factor de cobertura de k=2, suponiendo un intervalo de confianza entorno al valor nominal de aproximadamente el 95% / The uncertainties contained in this report have been calculated with a coverage factor k=2, assuming a confidence interval around the nominal value approximately 95%

(1) Información suministrada por el cliente (2) Norma aplicada / (1) Customer supplied information (2) Method used

PT-LM-LE18.1 R5



INFORME DE ENSAYO DE PLEGADO

BEND TEST REPORT



Pedido / Job n°:	Telefónico	Norma de ensayo / Standard:	UNE EN ISO 5173:2011
Nº Cupon / Coupon n°:	Tubu DG	Máquina Nº / Machine n°:	0400-0229
Material / Material (1):	Superduplex	Fecha Recepción / Reception date:	28/08/2014
Lubada / Heat (1):	not aplicable	Fecha Ensayo / Test date:	28/08/2014
Especificación / Specification:	NR 216, Ch 5, Sec 4	Procedimiento de Ensayo / Test procedure:	PE/LM-LE07 R.1
Temperatura de Ensayo / Test temperature:	23°C ± 5 °C		

Muestra / Specimen	Localización Probeta / Specimen location (1)	Orientación Probeta / Specimen Orientation (1)	Tipo de Doblado / Bend Type (1)	Dimensiones Probeta / See Specimen (L x w x t) (mm)			Dia. Máx. Flange / Flange diameter (mm)	Esp. Separación / Seal separation (mm)	Resultado Test Result	Observaciones / Remarks
FB1		Transverso	TFBB	181	30	7,0	24	42	O.K.	
FB2		Transverso	TFBB	185	30	7,0	24	42	O.K.	
RB1		Transverso	TRBB	183	30	7,0	24	42	O.K.	
RB2		Transverso	TRBB	184	31	7,0	24	42	O.K.	
SB1		Transverso	SBBS	181	7	10,0	24	42	O.K.	
SB2		Transverso	SBBS	184	7	10,0	24	42	O.K.	

Observaciones / General Remarks

Soldador: David Gómez

Preparado por / Prepared by:

Cristina Abascal
Analista Laboratorio de Ensayos
Laboratory Test Analyst

(1) Información suministrada por el cliente (2) Norma anulada / (1) Customer supplied information (2) Withdrawn standard

PE-LM-LE07.1 B3



INFORME DE ENSAYO DE DUREZAS

HARDNESS
TEST REPORT



Nº Pedido / Jobs nº:	OTL01895	Norma de ensayo / Standard:	(2) UNE EN 1043-1:1996		
Nº Cupón / Coupon nº:	Tubo DG	Nº Máquina / Machine nº:	0310-6829		
Material / Material (1):	Not Applicable	Fecha Recepción / Reception date:	27/08/2014		
Colada / Heat (1):	Not Applicable	Fecha Ensayo / Test date:	28/08/2014		
Especificación / Specification:	NR 21.6, Ch 5, Sec 4	Procedimiento de Ensayo / Test procedure:	PE/LM-LE04 R5		
Temperatura de Ensayo / Test temperature:	23°C +/- 5°C				
SPECIMEN M1					
L1	INDENTATION	HARDNESS	L2	INDENTATION	HARDNESS
	1	269 HV 10		1	278 HV 10
	2	269 HV 10		2	275 HV 10
	3	270 HV 10		3	275 HV 10
	4	269 HV 10		4	255 HV 10
	5	256 HV 10		5	269 HV 10
	6	261 HV 10		6	257 HV 10
	7	271 HV 10		7	272 HV 10
	8	267 HV 10		8	274 HV 10
9	267 HV 10	9	275 HV 10		

Incertidumbre / Uncertainty: 13,6 HV 10

Observaciones / General Remarks

Soldador: David Gómez

Los valores de incertidumbre expandida aplican a las lecturas individuales de dureza, no al conjunto de la probeta / Uncertainty value is only applicable to single values, not the whole specimen

Preparado por / Prepared by:

Mª del Mar Crespo
Analista Laboratorio de Ensayos /
Laboratory Test Analyst

Las incertidumbres recogidas en el presente informe se han calculado con un factor de cobertura de 2, suponiendo un intervalo de confianza entorno al valor nominal de aproximadamente el 95% / The uncertainties contained in this report have been calculated with a coverage factor k=2, assuming a confidence interval around the nominal value approximately 95%

(1) Información suministrada por el cliente (2) Norma ensayo / (1) Customer supplied information (2) Method standard

PT-LM-LE22.1 R5

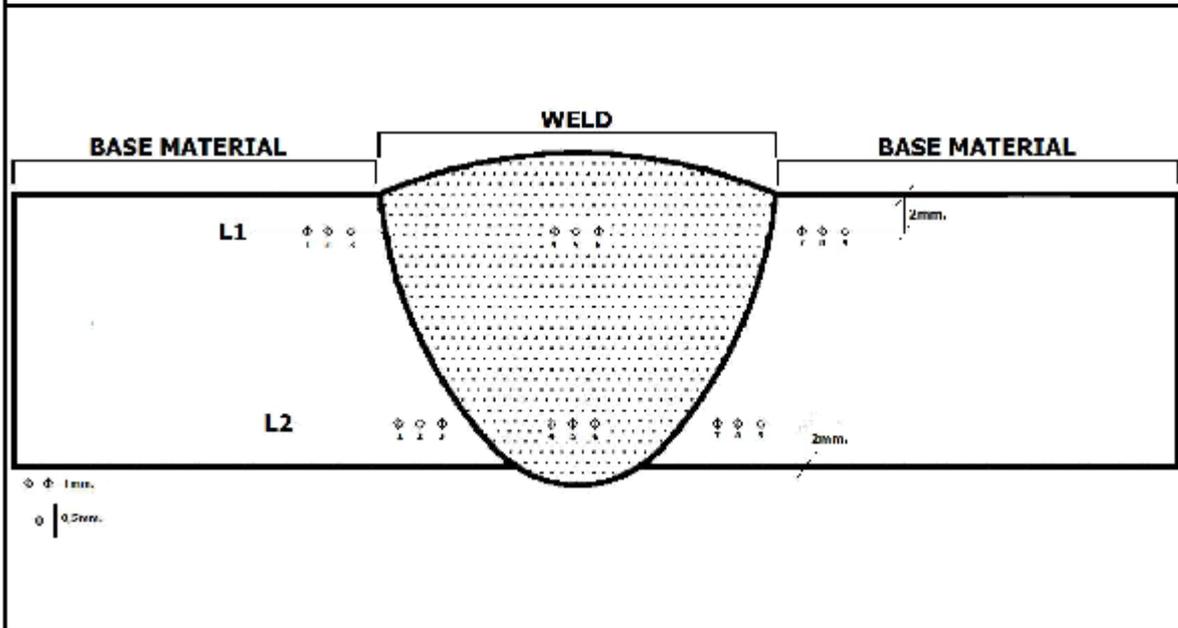


INFORME DE ENSAYO DE DUREZAS

HARDNESS TEST REPORT



Nº Pedido / Jobs nº:	OTL01995	Norma de ensayo / Standard:	(2) UNE EN 1043-1:1996
Nº Cupón / Coupon nº:	Tubu DG	Nº Máquina / Machine nº:	0310-6829
Material / Material (1):	Not Applicable	Fecha Recepción / Reception date:	27/08/2014
Culada / Heat (1):	Not Applicable	Fecha Ensayo / Test date:	28/08/2014
Especificación / Specification:	NR 21G, Ch 5, Sec 4	Procedimiento de Ensayo / Test procedure:	PE/LM-LE04 R3
Temperatura de Ensayo / Test temperature:	23°C +/- 5°C		



Las incertidumbres recogidas en el presente informe se han calculado con un factor de cobertura de k=2, suponiendo un intervalo de confianza entorno al valor nominal de aproximadamente el 95% / The uncertainties compiled in this report have been calculated with a coverage factor k= 2, assuming a confidence interval around the nominal value approximately 95%

(1) Información suministrada por el cliente (2) Norma ensayo / (1) Customer supplied information (2) Method standard

PT-LM-LE22.1 R3



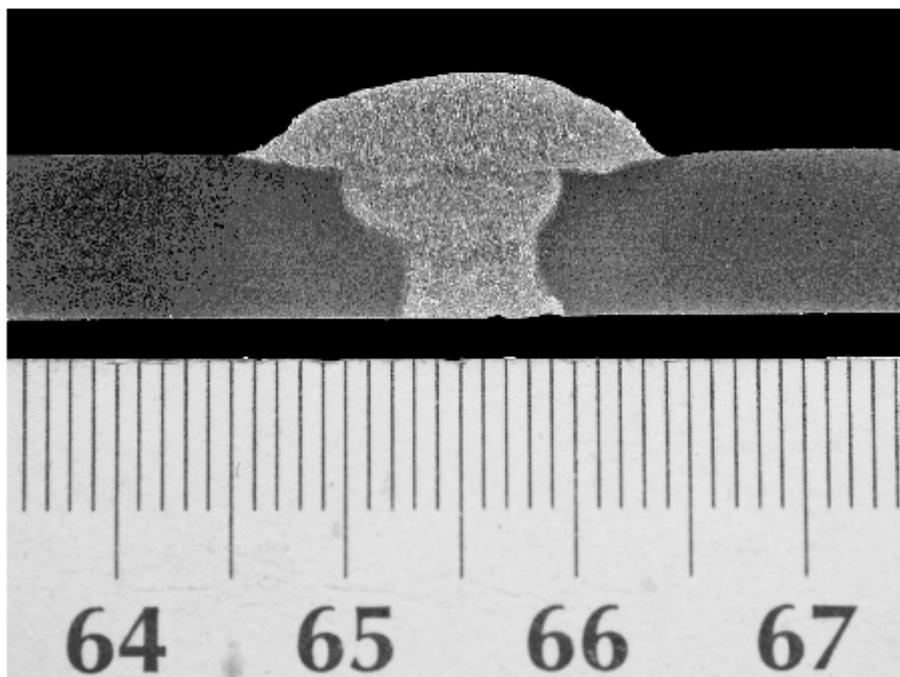
INFORME DE ENSAYO MACROGRAFICO

MACROGRAPHIC TEST REPORT



Nº Cupón / Coupon nº:	Tubo DG	Norma Ensayo / Standard:	UNE-EN ISO 17639-2013
Material / Material(1):	Not Applicable	Máquina de Ensayo / Test machine:	0310-6699
Calada / Heat (1):	Not Applicable	Fecha Recepción / Reception date:	27/08/2014
Especificación / Specification:	NR 216, Ch 5, Sec 4	Fecha Ensayo / Test date:	28/08/2014
Temperatura de Ensayo / Test temperature:	23°C +/- 5°C	Procedimiento de Ensayo / Test procedure:	PE-LM-LE 09 R0

Muestra / Sample: M1
 Ataque / Etching: NACH 20% Electrolytic



Resultados / Results

(*) In the macrographic examination not defects were observed.

Observaciones / General Remarks

Soldador: David Gómez.

(*) Macrographic examination meets with ISO 5817:2003 in accordance with paragraph 7.5 of EN ISO 15614-1:2004 and with paragraph 7 of EN 287-1:2004

Preparado por / Prepared by:

Mª del Mar Crespo
 Analista Laboratorio de Ensayos /
 Laboratory Test Analyst

Mar Crespo

(1) Información suministrada por el cliente (2) Norma retirada / (1) Customer supplied information (2) Withdrawn standard

PT-LM-LE 28.1 R5

7.3 ANEXO III – DIMENSIONES DE PROBETAS DE ENSAYO

En este apartado encontraremos las dimensiones y tolerancias de las probetas de ensayo de impacto y tracción transversal, conforme a las Reglas de Clasificación de Bureau Veritas, en concreto a la **NR216, Ch. 1, Sec. 2 Testing Procedures for Materials**.

Además, se incluyen las dimensiones de la probeta de ensayo de tracción transversal de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 4136 Ensayos destructivos de uniones soldadas en materiales metálicos. Ensayo de tracción**.

Tabla 28. Dimensiones de probeta de ensayo de impacto según reglas de BV.

Denominación	Dimensiones	Tolerancia
Longitud	55 mm	$\pm 0,60$ mm
	Probeta estándar	10 mm
Anchura	7,5 mm	$\pm 0,11$ mm
	Probeta reducida	5,0 mm
Espesor	10 mm	$\pm 0,06$ mm
Espesor bajo entalla	8 mm	$\pm 0,06$
Ángulo de entalla	45°	$\pm 2^\circ$
Radio de entalla	0,25 mm	$\pm 0,025$ mm
Distancia de la entalla al extremo	27,5 mm	$\pm 0,42$ mm
Ángulo entre plano de simetría de entalla y eje longitudinal de la probeta.	90°	$\pm 2^\circ$

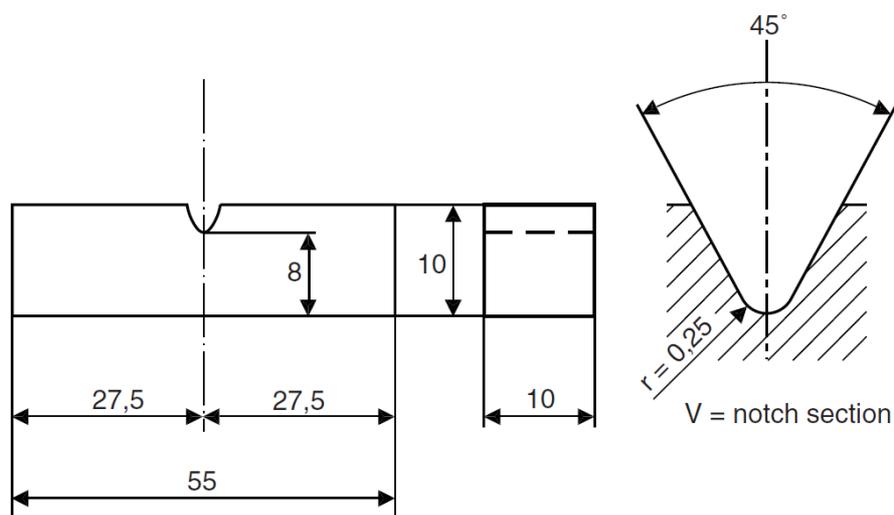


Figura 27. Esquema de dimensiones de probeta de ensayo de impacto Reglas de BV.

Tabla 29. Dimensiones de probeta de ensayo de tracción según UNE-EN ISO 4136

Denominación	Símbolos	Dimensiones
Anchura de la zona de amarre	b_1	$b + 12$
Chapas	b	12 para $t_s \leq 2$
		25 para $t_s > 2$
Espesor de la longitud calibrada	b	6 para $D \leq 50$
		12 para $50 < D \leq 168,3$
Longitud calibrada ^{a,b}	L_c	25 para $D > 168,3$
		$\geq L_s + 60$
Radio de acuerdo con la zona de amarre	r	≥ 25

Medidas en milímetros

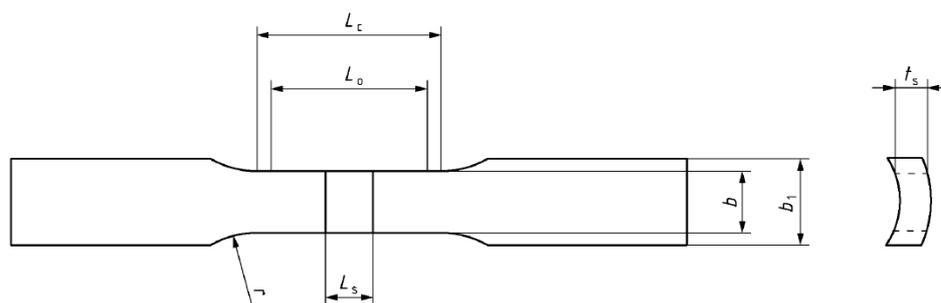


Figura 28. Esquema de dimensiones de probeta de ensayo de tracción. UNE-EN ISO 4136.

Tabla 30. Dimensiones de probeta de ensayo de tracción según reglas de BV.

Denominación	Símbolos	Dimensiones
Longitud inicial de la zona calibrada	L_0	$5,65 \cdot \sqrt{S_0}$
Longitud calibrada	L_c	$L_0 + 2b$
Radio de acuerdo con la zona de amarre	r	≥ 25

Medidas en milímetros

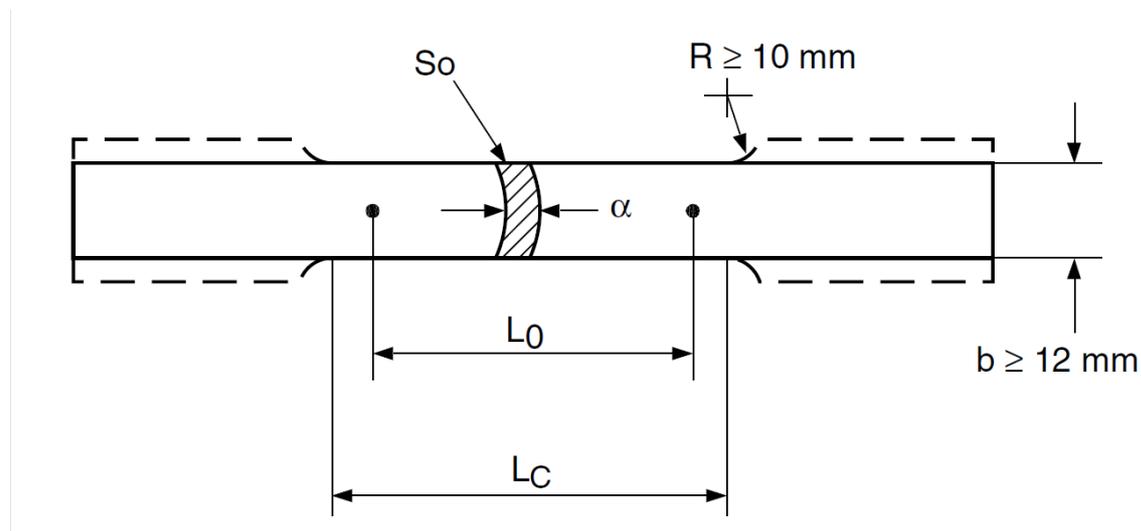


Figura 29. Esquema de dimensiones de probeta de ensayo de tracción. Reglas de BV.

7.4 ANEXO IV – CERTIFICADOS DE MATERIAL BASE Y DE APORTE

A continuación, podemos encontrar los certificados del material base y de los materiales de aporte.

El material base viene validado por un certificado de inspección EN 10204 / 3.1 suministrado por el fabricante **TUBACEX**.

El material de aporte viene certificado por un informe del fabricante, **ESAB**, y, en el caso de las varillas para TIG, además con un certificado de la agencia **VdTÜV**, validada por la Sociedad de Clasificación.



**INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICADO DE INSECCION
CERTIFICAT DE RECEPCION
ABNAHMEPRUFZEUGNIS
EN 10204:2004 / 3.1**

Number: 584520	Rev: 00
Page: 1 / 8	
Created on: Date: 10.07.2013	Modified on: 15.07.2013

T11 - TUBACEX TUBOS INOXIDABLES

Registro Mercantil de Alava, Tomo 587, Folio 189, Hoja VI 2845 - N.º F. A-0140227

Tres cañes, 8
01400 Lado (Alava)
SPAIN

TEL: +34 946191933
FAX: +34 946125062
E-MAIL: quality@tubacex.es

CUSTOMER DESCRIPTION/DESCRIPCIÓN DEL CLIENTE/KUNDENZBEZEICHNUNG/COMMETTANT

CLIENT SOLD / SOLICITANTE/AUFTRAGGEBER/COMMETTANT COMERCIAL DE TUBOS Y ACCESORIOS ESPECIALES, S.A. POLIGONO INDUSTRIAL SARATXO 35 01470 AMURRIO	CLIENT SHIP TO/DESTINAT. COTUBES, S.A. POLIGONO INDUSTRIAL SARATXO 01470 AMURRIO
--	--

CLIENT ORDER/PEDIDO CLIENTE/KUNDEN AUFTRAGSNUMMER/NO. DE COMMANDE: 501140

SALES ORDER/PEDIDO VENTAS/AUFTRAGSNUMMER/NO. DE COMMANDE D'USINE: 129701

**MATERIAL:SEMI. STRNG. STEEL TUBES/TUBOS/TUBOS INOXIDABLES SIX SOLAR 3096/TUBES INOX SANS SOUDURE/ANNELEUSE
TUBOS/ANNELES**
**HEAT-TREATED, PICKLED / PASADO, DECANADO / HYPERHEAT, DECREE / WÄRMEBEHANDLT, GEBISST, PICKING-PASSIVIERD
/ PASIVADO / PASSEVÉ / PASSIVIERT**
GRADE / ACERO / GRADE / WERKSCHOTT: S32760,1,4501,
**STANDARD / NORMA / STANDARD / LIEFERUNG NACH: NORSK 8629,11 PART A S309/S315EN-2010 (S), 2011 ADD,
 ASTM A312/A312M-11**
EN 10216-2:2004 TUB
NORSK 8630 REV.5 NOS 051 REV.4
CHECK ANALYSIS
CORROSION TESTED ACC. TO ASTM A262 PRACTICE B
CORROSION TESTED ACC. TO ASTM A275 TEST METHOD C
CORROSION TESTED ACC. TO ASTM G48 TEST METHOD A
CORROSION TESTED ACC. TO EN ISO 9611-2 PRACTICE B
CORROSION TESTED ACC. TO MIL-P-24591/3/ASTM A262 PRACTICE B
PIGMENT CONTENT IN ACC. WITH ASTM E562-11
MICROGRAPHIC EXAMINATION
NACE MR0175-ISO 15156-3:2003
ULTRASONIC TEST ACCORDING TO ASTM A650/E213
TOLERANCES / TOLERANCIAS / TOLERANZEN / TOLERANZIER NACH: ASTM A599/A599M-12
EN ISO 1127/03.97 D3/C3
RANDOM LENGTHS / LONGOS VARIABLES / LONGUEUR COURANTE / RINGENGRÖSSE LANGE 5.500/5.500 MM
PLATE FINIS / ALISO / EXTRÊMITE D'ROBESSE / CLAPTE ENDIN.
DIMENSIONS/DIMENSIONES/EMENSIONS/DIMENSIONS: 73,01 X 7,01 / 2.1/2" SCH 80S
CRD. FINISHED/LAMINADOS DE VACO/KALTGEFORMT/LAMINÉS A FROID

Sales Item	Client Item	Delivery No	Lot No.	Heat No	Pieces	Weight	Tot Lgth	Un Lgth
Pos Prod.	Pos Client	Nº Entrega	Nº Inte	Calada	Piezas	Peso	Long. Tot	Long. Un
Auftrag Pos	Kunde Pos	Lieferung	Los Nr.	Schmelze	Stück	Gewicht	Gesamtlänge	Längentyp
Usine Pos	Com. Pos	Avis. d'exp	Lot d'inspection	Contee	Pos	Poids	Totlength	Long. Un



Warranty is only valid if the material has been inspected by the factory. It is not valid if the material has been inspected by a third party. The warranty is only valid if the material has been inspected by the factory. It is not valid if the material has been inspected by a third party. The warranty is only valid if the material has been inspected by the factory. It is not valid if the material has been inspected by a third party.



**TUBACEX TUBOS
INOXIDABLES S.A.**
INGENIERA DE CALIDAD

 Inigo Arriola Naber



**INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICADO DE INSPECCION
CERTIFICAT DE RECEPCION
ABNAHMEPRUFZUGNIS
EN 10204:2004 / 3.1**

Number: 584520 Page: 2 / 6	Rev: 00
Created on: Date: 10.07.2013	Modified on: 15.07.2013

Sales Item Pos. Prod.	Client Item Pos. Clint.	Delivery No. N° Entrega	Lot No. N° lote	Heat No. Calada	Pieces Piezas	Weight Peso	Tot Lgth Long. Tot	Un Lgth Long. Un
AudOrg/Pos Usine Pos	Kunde Pos Cum. Pos	Referring Avis. d'exp	Ins. Nr. Lot d'inspection	Schmelze Cantec	Stück Pes	Gewicht Poids	Gesamtlänge Totlength	Längentyp Long. Un
79		8110627635	200104346	46659	20	2,074 KC	179,35 M	5500-6500 MM

Heat No.	Supplier	Method
46659	ACERLAVA (SPAIN)	Electric furnace-AO3

CHEMICAL COMPOSITION (%)/COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)/CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG (%)/COMPOSITION CHIMIQUE(%)												
Heat	Seq	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	W	
L 46635	1	0,018	0,68	0,450	0,024	0,0006	6,90	25,55	3,62	0,63	0,500	
C 46659	9	0,021	0,66	0,440	0,025	0,0010	7,60	25,60	3,60	0,64	0,510	
Heat	Seq	N	Pren									
L 46659	1	0,2310	41,1920									
C 46659	9	0,2310	41,1760									

HEAT TREATMENT/TREATAMIENTO TÉRMICO/WÄRMEBEHANDLUNG/TRAITEMENT THERMIQUE
 HEAT TREATED 1100 °C / TRATAMIENTO DE PERNANENCIA >= 1.5 HR/AN ENFRIADOS AL AGUA.
 SOFTENED 1100 °C HOLDING TIME >= 1.5 MIN / EN WATER COOLING.
 ERWEICHUNG 1100 °C TEMPE DE PERNANENCIA >= 1.5 MIN/AN ABKÜHLUNG A 0° BAU.
 WÄRMEBEHANDLUNG 1100 °C HALTERZEIT >=1.5 HR/AN WASSERABKÜHLUNG

Lot No.	Sample	T	Rp0.2	Rp1.0	Rm	A2"	A5	Type
		°C	MPa	MPa	MPa	%	%	
200104346	1	20	694	764	873	28	27	L
	2	20	692	758	870	30	29	L

Lot No.	Sample	HRC1	HRC2
200104346	1	27,0	28,0
	2	27,0	28,0

Lot No.	Sample	T	Wspec	Ecc 1	Ecc 2	Ecc 3	Ecc AVG	Type
		°C	mm	J	J	J	J	
200104346	1	-51	5,00	122	125	129	125	L

Lot No.	Sample	T	Pits-20x	Wloss	time
		°C	mm	mm	Hours
200104346	1	50	N	6,9589	24,0



TUBACEX TUBOS INOXIDABLES S.A.
 NORMA DE CALIDAD

 Tigo Arellano AAR000



As shown on this certificate, the material meets the requirements of the standard. The purchaser is responsible for the correct use of the material and for the correct interpretation of the certificate. The certificate is valid only if it is signed by the responsible person. The certificate is not valid if it is not signed by the responsible person. The certificate is not valid if it is not signed by the responsible person. The certificate is not valid if it is not signed by the responsible person.



**INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICADO DE INSPECCION
CERTIFICAT DE RECEPTION
ABNAHMEPRUFZEUGNIS
EN 10204:2004 / 3.1**

Number: 584520	Rev: 00
Page: 3 / 8	
Created on: Date: 10.07.2013	Modified on: 15.07.2013

CORROSION ACCORDING TO ASTM G48A

Lot No.	Sample	T	P16-20s	W.Loss	Time
		%	N	µm2	Hours
200104346	1	20	N	0,6958	24,0

FERRITE ACCORDING TO ASTM E 562/FERRIT UNTERSCHIEDSASTM E562

Lot No.	Sample	%Fer	Dev.Ferr
200104346	1	35,91	2,41

METALURGICAL TESTS/ENSAYOS METALÚRGICOS/METALLURGISCHE PRÜFUNGEN/ESSAIS METALLURGIQUES

ETCH STRUCTURE ACC. ASTM A923 MET.A: UNAPPROVED STRUCTURE. MATERIAL FREE FROM INTERMETALLIC PHASES AND RESCRIPTURES. DEFORM STRUCTURE NEGROSS FULL WALL THICKNESS
EXAMEN DE MICROESTRUCTURA DE ACUERDO A ASTM A923 MET.A: ESTRUCTURA NO APROBADA. MATERIAL LIBRE DE FASES INTERMETÁLICAS Y FRACTURAS/MATERIALES. ESTRUCTURA EN PAREDES A TRAVÉS DEL ESPESOR.

INTERGRANULAR CORROSION TEST ACC. TO DIN EN ISO 3651-2 MET.D: SATISFACTORY
ENSAYO DE CORROSION INTERCRANIAL DE ACUERDO A ISO 3651-2 MET.D: SATISFACTORIO
UNTERRÜCKIGKEIT GEGEN INTERKRISTALLINE KORROSION UNTERSCHIEDS ISO 3651-2 MET.D: IN ORDNUNG
ESSAI DE CORR. INTERGR. SELON ASTM ISO 3651-2 MET.D: SATISFAISANT

INTERGRANULAR CORROSION TEST ACC. TO ASTM A262
FRACT.E/MIL-P-24691-3: SATISFACTORY
ENSAYO DE CORROSION INTERGRANULAR DE ACUERDO A ASTM A262
FRACT.E/MIL-P-24691-3: SATISFACTORIO

DESSENSIBILISIERUNG GEGEN INTERKRISTALLINE KORROSION UNTERSCHIEDS ASTM A262
FRACT.E/MIL-P-24691-3: IN ORDNUNG
ESSAI DE CORR. INTERGR. SELON ASTM ASTM A262 FRACT.E/MIL-P-24691-3: SATISFAISANT

NON-DESTRUCTIVE TESTS/ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS/ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNGEN/ESSAIS NON DESTRUCTIFS

100% ULTRASONIC TEST ACC. TO ASTM E.213: SATISFACTORY
100% ENSAYO DE ULTRASONIDOS DE ACUERDO A ASTM E.213: SATISFACTORIO
100% ULTRASCHALLPRÜFUNG NACH ASTM E.213: IN ORDNUNG
100% ESSAI D'ULTRASON D'ACCORD A ASTM E.213: SATISFAISANTE



TUBACEX TUBOS INOXIDABLES S.A.
INGENIERIA DE CALIDAD

Diego Antonio Muñoz

The hereby certify that the product is in conformity with the requirements of the specification, design, order and drawings to which it refers, provided the purchaser has supplied the correct information. This certificate is valid for a maximum of 12 months from the date of issue. It is not valid if the product is not in conformity with the requirements of the specification, design, order and drawings to which it refers. The purchaser is responsible for the correct use of the product. The purchaser is responsible for the correct use of the product. The purchaser is responsible for the correct use of the product.



**INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICADO DE INSPECCION
CERTIFICAT DE RECEPTION
ABNAHMEPRUFZEUGNIS
EN 10204:2004 / 3.1**

Number: 584520	Rev: 00
Page: 4/6	
Created on: Date: 10.07.2013	Modified on: 15.07.2013

100% ULTRASONIC TEST ACC. TO EN 10246-7, U2C: SATISFACTORY
100% ENSAYO DE ULTRASON DUE DE ACUERDO A EN 10246-7, U2C: SATISFACTORIO
100% ULTRASCHALLPRUFUNG NACH EN 10246-7, U2C:
IN ÜBEREIN
100% ESSAI D'ULTRASON D'ACCORD A EN 10246-7, U2C: SATISFAISANT

POSITIVE MATERIAL IDENTIFICATION TEST ON EACH TURB/TUBE BY
"X-RAY-FLUORESCENCE ANALYSER": SATISFACTORY
VERIFICACION DEL GRADO DE PUREZA DE CADA TUBO MEDIANTE ANALIZADOR DE
FLUORESCENCIA DE RAYOS X": SATISFACTORIO
VERWACHSUNGSPRUFUNG AN JEDEN TUBE MIT
"RÖNTGEN-FLUORESCENZ-ANALYSATOR": IN ÜBEREIN
VERIFICATION DE LA PURITE SUR CHAQUE TUBE PAR
"X-RAY-FLUORESCENCE-ANALYSER": SATISFAISANT

HYDRAULIC PRESSURE TESTED AT 170 bar, 2450 PSI DURING 5 SEC ON EACH
TUBE/PIPE: SATISFACTORY
ENSAYO HIDROSTATICO A 170 BAR, 2450 PSI DURANTE 5 SEC EN CADA TUBO:
SATISFACTORIO
WASSERDRUCKPRUFUNG BEI 170 bar, 2450 PSI HALTZEIT 5 SEC JE RHR: IN
ÜBEREIN
ESSAI DE PRESSION HYDROSTATIQUE À 170 bar, 2450 PSI PENDANT 5 SEC SUR
CHAQUE TUBE: SATISFAISANT

100% TROY CORROS TEST AT DIB EN 10246-2: SATISFACTORY
100% ENSAYO DE CORROSION INDUCIDA DE ACUERDO A DIB EN 10246-2:
SATISFACTORIO
100% MIEBELSTROM PRUFUNG NACH DIN EN 10246-2: O.B.
100% CONTROLE CORROSION VOLCANUT D'APRES DIN EN 10246-2: S'BY

DIMENSIONAL CHECKING ON EACH TUBE: SATISFACTORY
INSPECCION DIMENSIONAL AL 100% DE LOS TUBOS SATISFACTORIA
100% MASSKONTROLLE: O.B.
VERIFICATION DIMENSIONNELLE AU 100% DES TUBES, SATISFAISANT

VISUAL INSPECTION ON EACH TUBE: SATISFACTORY
INSPECCION VISUAL AL 100% DE LOS TUBOS, SATISFACTORIA
100% BESICHTIGUNG: O.B.
EXAMEN VISUEL AU 100% DES TUBES, SATISFAISANT

TECHNOLOGICAL TESTS/ENSAYOS TECNOLÓGICOS/TECHNOLOGISCHE
PRÜFUNGEN/TECHNOLOGICAL TESTS

FLAWING TEST: SATISFACTORY
RECORDADO S. NORMA: SATISFACTORIO



TUBACEX TUBOS
INOXIDABLES S.A.
INGENIERA DE CALIDAD
[Signature]
Dña. Araceli Álvarez

As hereby only the tubes of this manufacturer, certified being, are
issued with a valid certificate of inspection and approval. In
consequence, a tube by a non-certified manufacturer will not comply with the terms
of this certificate and will not be covered by the manufacturer's liability. In order to
verify this, the customer should check the manufacturer's identification of a certified
and highly processed.



**INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICADO DE INSPECCION
CERTIFICAT DE RECEPCION
ABNAHMEPRÜFZEUGNIS
EN 10204:2004 / 3.1**

Number: 584520 Page 5/6	Rev: 00
Created on: Date: 10.07.2013	Modified on: 15.07.2013

ANFERTIGUNG: IN ORDNUNG
 ESSAI D'APPROBATION: SATISFAISANT

 CHATTERING TEST: SATISFACTORY
 ADJUSTADO S.ROBOTA: ENTSPROCKELT
 RINGFAHVERSUCH: IN ORDNUNG
 ESSAI D'APPROBATION: SATISFAISANT

MARKING/ETIQUETADO/KENNZEICHNUNG/MARKSTIFT
 027 XKL TUBACEX 73,08 X 7,01 / 2,1/2" SCH EGS NAME 84700 8500 8190 EN 10216-5 TC2 E32760 1.4501 CHD CD SMLS
 0899/ P21-MV LOT NO/ MADE IN SPAIN

REMARKS/OBSERVACIONES/ANMERKUNG/REMARQUES

 NO MERCURY, MERCURY COMPOUNDS OR MERCURY BEARING INSTRUMENTS AND/OR EQUIPMENT HAVE BEEN USED ALONG
 MANUFACTURING AND INSPECTION PROCESS.
 DURANTE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN E INSPECCIÓN NO SE HA USADO MERCURIO NI INSTRUMENTOS Y/O EQUIPOS
 CONTENIDO MERCURIO O CON COMPONENTES DE MERCURIO.
 KEINE QUEKSILBER, BZW. QUEKSILBERVERUNREINIGTES KOMPONENTEN ODER KLUGLAGERINSTRUMENTE UND/ODER GERÄTE SIND
 BENUTZT WORDEN PRODUKTIONS UND BESICHTIGUNGSPROZESS.
 IL N'Y A PAS ÉTÉ FAIT USAGE DE MERCURE, DE COMPOSÉS CONTENANT DU MERCURE OU DE MATÉRIAUX ET/OU D'INSTRUMENT
 CONTENANT DU MERCURE TOUT AU LONG DES ÉTAPES DE FABRICATION ET DU PROCESSUS D'INSPECTION ET DE CONTRÔLE.

 NO WELDING OR WELD REPAIRS WERE MADE
 SIN REPARACION POR SOLDADURA
 KEINE SCHWEISSBEARBEITUNG WURDE VORGENOMMEN
 SANS RÉPARATION AVEC SOUDURE

 MATERIAL MANUFACTURER APPROVED BY TÜV SÜD Industrie Service GmbH (NOTIFIED BODY 0036) TO ISSUE CERTIFICATES OF
 SPECIFIC PRODUCT CONTROL IN ACCORDING TO PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE 97/23/EC ANNEX I POINT 4.1.
 FABRICANTE DE MATERIALES APROBADO POR TÜV SÜD Industrie Service GmbH (ORGANISMO NOTIFICADO 0036) PARA LA
 EMISION DE CERTIFICADOS ESPECIFICOS DE CONTROL DE PRODUCTO DE ACUERDO AL ANEXO I, PUNTO 4.1 DE LA DIRECTIVA
 DE EQUIPOS A PRESION 97/23/EC.
 WERKSTOFFHERSTELLER MIT BERECHTIGUNG ZUR AUSSTELLUNG VON BESCHEINIGUNGEN ÜBER SPEZIFISCHE PRÜFUNGEN AN DEN
 WERKSTOFFEN IM GÜLTIGKEITSBEREICH DER ZERTIFIZIERUNG UND IN ÜBEREINSTIMMUNG MIT DER DRUCKGERÄTE-RICHTLINIE
 97/23/EC UND DEN ZUGRÜNDE LIEFEREN SPEZIFIKATIONEN ENTSPE. DER BENANNTEN STELLE NR 0036, TÜV SÜD Industrie
 Service GmbH
 PRODUCTEUR DE MATERIE, APPROUVE PAR TÜV SÜD Industrie Service GmbH (N.B. 0036) POUR EMISSION DES CERTIFICATS
 SPECIFIQUE DE CONTROL DE PRODUCT SELON LA DIRECTIVE DES EQUIPES A PRESION 97/23/EC ANNEXE I POINT 4.1.

 MATERIAL CHARACTERISTICS COMPLY WITH POINT 7.5 OF ANNEX I TO PED BY HAVING AN ELONGATION AFTER RUPTURE AT
 TENSILE TEST NO LESS THAN 14% AND A BENDING RUPTURE ENERGY AT IMPACT TEST NO LESS THAN 27J AT 20°C.
 LAS CARACTERISTICAS DEL MATERIAL CUMPLEN CON LOS REQUISITOS DEL PUNTO 7.5 DE LA DIRECTIVA PED POR TENER UN



TUBACEX TUBOS
 INOXIDABLES S.A.
 INGENIERIA DE CALIDAD

 Artigo assinado Alencar

We hereby certify that the holder of this document has been manufactured, sampled, tested and
 inspected in accordance with the applicable specifications and standards of the relevant standards. This
 certificate is issued by a competent authority and is not valid for legal purposes. It can be used
 as evidence to support a case of liability. The manufacturer is responsible for the accuracy and validity
 of the information provided in this document and shall remain liable for any consequences of incorrect
 or illegible information.



**INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICADO DE INSEPCION
CERTIFICAT DE RECEPCION
ABNAHMEPRUFZEUGNIS
EN 10204:2004 / 3.1**

Number: 584520 Page: 6 / 6	Rev: 00
Created on: Date: 10.07.2013	Modified on: Date: 15.07.2013

REMARKS/OBSERVACIONES/ANMERKUNG/REMARQUES
 ALLARGAMENTO TRAS ROTURA EN EL ENSAYO DE TRACCION NO INFERIOR AL 14% Y PUNTO DE TRACCION NO INFERIOR AL 14% Y POR
 TENIR UNA RESISTENCIA AL IMPACTO NO INFERIOR A 27J A 20° C.
 DIE WERKSTOFF-WERKE ENTSPRECHEN PUNKT 7.5. DER DGRK, ANHANG I, MIT EINER BRUCHDEHNUNG = 14% IM NORMGEMASS
 DURCHFUEHRTEN ZUGVERSUCH UND DER KERBSCHLAGARBEIT = 27J AN EINER ISO - Y PRO PROBE BEI EINER TEMPERATUR VON
 HOECHSTENS 20° C
 LES CARACTERISTIQUES DU MATERIEL, AYANT UN ALLONGEMENT APRES RUPTURE A L'ESSAI DE TRACTION NON INFERIEUR DU
 14% ET UNE RESISTANCE A LA FLEXION PAR CHOC A 20° C NON INFERIEUR A 27J, SONT CONFORMES AUX PRESCRIPTIONS DU
 PONT 7.5 DE L'ANNEXE I DE PED.

 MATERIAL IS FREE OF RADIATION CONTAMINATION
 EL MATERIAL ESTA LIBRE DE CONTAMINACION POR RADIACIONES
 MATERIAL IS FREI VON RADIOAKTIVITAET
 MATÉRIEL LIBRE DE POLLUCION RADIOACTIVE



**TUBACEX TUBOS
INOXIDABLES S.A.**
INGENIERIA DE CALIDAD
[Signature]
 Yllago Arizola Aizcor

All further work that has been carried out has been checked and approved and recorded in accordance with the applicable regulations and standards. The customer is responsible for the correct use of the product. The manufacturer is not responsible for the use of the product in any other way than intended. The manufacturer is not responsible for the use of the product in any other way than intended. The manufacturer is not responsible for the use of the product in any other way than intended.



INSPECTION CERTIFICATE
EN 10204 3.1
Annex 1
Microphotographs

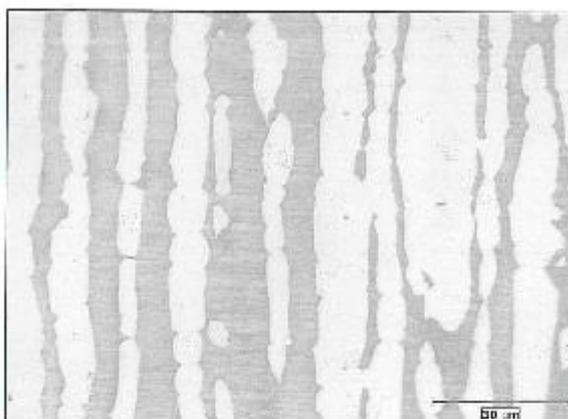
Number :	584520
Page :	1/1
Date :	21/07/2014

TTI - TUBACEX TUBOS INOXIDABLES, S.A.
 Registro Mercantil de Alava, Torre 567, Pab. 145, Ursa 962/965 - R.I.F. A-01140227
 Tuba Cuicas, 8
 41403 Llodio (Álava)
 SPAIN

Sales Order : 129701
 Sales Item : 70

 Standard : ASTM A790
 Grade : UNS S32760
 Dimensions : 2.1/2" SCH 80S

Microstructure: MATERIAL FREE FROM INTERMETALLIC PHASES AND PRECIPITATES. UNIFORM STRUCTURE ACROSS FULL WALL THICKNESS



P-1307184_129701-70_C-48659_LONG_500_X.jpg



Este certificado acredita que el fabricante cumple con los requisitos de la norma EN 10204 3.1. No garantiza el cumplimiento de los requisitos de la norma EN 10204 3.1. El fabricante es responsable de la conformidad del producto con los requisitos de la norma EN 10204 3.1. Este certificado no garantiza el cumplimiento de los requisitos de la norma EN 10204 3.1. El fabricante es responsable de la conformidad del producto con los requisitos de la norma EN 10204 3.1.



TUBACEX TUBOS
 INOXIDABLES
 INGENIERIA DE CALIDAD

[Handwritten Signature]
 ERIKO ARRIOLA BILBAO



Product Data Sheet

W Tungsten inert gas arc welding

OK Tigrod 2509

Prepared by Mats Lindé	Qualified by Christina Skodree	Approved by Mikael Mimer	Reg no EN005764	Canceling EN005247	Reg date 2012-03-30	Page 1 (2)
---------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	--------------------	-----------------------	------------------------	---------------

REASON FOR ISSUE

Classification changed from EN ISO 14343 to EN ISO 14343-A. Maximum Mn content revised

GENERAL

Bare corrosion resisting "Super Duplex" rods for welding of austenitic-ferritic stainless alloys of 25% Cr, 7% Ni, 4%Mo, low C types.

OK Tigrod 2509 has high intergranular, pitting and stress corrosion resistance. The alloy is widely used in applications where corrosion resistance is of utmost importance. Pulp & paper industry, offshore and gas industry are areas of interest.

Shielding Gas: I1, I3 (EN ISO 14175)

Alloy Type: Austenitic-ferritic (25 % Cr - 10 % Ni - 4 % Mo - Low C)

CLASSIFICATIONS Wire

SFA/AWS A5.9 ER2504

APPROVALS

VITOV 08593 (IT)

Not valid for colour coded 500 mm rods.

CLASSIFICATIONS Wire Electrode

EN ISO 14343-A W 25 B 4 N L

CHEMICAL COMPOSITION

	Wire/strip (%)	
	Min	Max
C		0.02
Si	0.2	0.5
Mn	0.3	0.7
P		0.025
S		0.020
Cr	24.0	26.0
Ni	9.0	10.5
Mo	3.5	4.5
W		1.0
Cu		0.3
N	0.20	0.30

MECHANICAL PROPERTIES OF WELD METAL

Properties	All Weld Metal	
	As welded Min	Typ
Rp0.2 (MPa)	550	670
Rm (MPa)	620	850
A4-A5 (%)	16	30
Z (%)		60
Charpy V at 20°C (J)		150
Charpy V at -40°C (J)		115

Comments:



Product Data Sheet

W Tungsten inert gas arc welding

OK Tigrod 2509

Prepared by Mats Lindé	Qualified by Christof Skodras	Approved by Mikael Mimer	Reg no EN005764	Cancelling EN005247	Reg date 2012-03-30	Page 2 (2)
---------------------------	----------------------------------	-----------------------------	--------------------	------------------------	------------------------	---------------

OTHER DATA

Welding should proceed with neither too low or too high heat input (general recommendation 0.2-1.5 kJ/mm).
Interpass temperature 100 degr.

Typical Ferrite in weld metal: FN 30-50.

VdTÜV-Kennblatt für Schweißzusätze

		1 Hersteller/Lieferer: ESAB / ESAB AB mit Herstellerwerken gemäß VdTÜV Liste 1000		2 Kennblatt- Nummer: 06593.07 12.2011	
3 Schweißzusatz: Schweißstab und Schweißdraht		5		Angaben des Herstellers	
4 Marke: OK Tigrod 2509					
7 Typ: EN ISO 14343 - W/P 25 9 4 NL					
11 Durchmesserbereich: 0,8 - 3,2 mm		12		Hilfsstoffe: EN ISO 14175 - II	
13 Die weitere Gültigkeit wird in der jeweils letzten Ausgabe der CD-ROM 'TÜV-egnungsgeprüfte Schweißzusätze' bescheinigt.					
15 Wärmebehandlung (Wb) nach dem Schweißen und Werkstoffe					
Pos	Wb	Gruppe / Werkstoff 1	Text	Gruppe / Werkstoff 2	Bem.
	U	Gruppe 10.1 (X2CrNiMoN225)			
	U	SANDVIK SAF 2307			(1)
	L	SANDVIK SAF 2307			(1)
	U	X 2 CrNiN 23 4			
16 Die Werkstoffenteilung entspricht ISO 15608:2000					
21 Wurzelschweißbarkeit: nachgewiesen					
23 Wanddicke: maximal 30 mm		24		Stromart und Polung: G-	
25 Schweißposition nach DIN ISO 6947: PA, PB, PC, PD, PE, PF					
26 Höchste Betriebstemperatur im Kurzzeitbereich wie Grundwerkstoff, jedoch max.:					250 °C
27 Höchste Betriebstemperatur im Langzeitbereich max.:					— °C
28 Tiefste Betriebstemperatur wie Grundwerkstoff, jedoch nicht tiefer als:					(2) -40 °C
29 Berechnungskennwert: wie Grundwerkstoff					
30 Bei Einsatz im Langzeitbereich: —					
31 Korrosionsbeständigkeit nachgewiesen nach: —					
32 Bemerkungen: Prägung des Schweißstabes: 25 10 4 L. Zwischentagtemperatur: maximal 150°C. (1) Lösungsgeglüht bei 1120°C / 20 min / Wasser (2) ausreichende Kerbschlagwerte wurden bis -60°C nachgewiesen (3) Der Zusatz IT wird auf dem Etikett der Chargen bzw. Los-Nr. angehängt.					
33 Die Eignungsprüfung erfolgte auf der Grundlage des VdTÜV-Merkblattes 1153. Soweit in Rubrik 32 - Bemerkungen - nicht anders angegeben, ist dieser Schweißzusatz unter Beachtung des Anhangs I Abschnitt 4 der Druckgeräterichtlinie für den Einsatz nach Druckgeräterichtlinie geeignet.					
34 Erläuterungen A - angelassen S - spannungsarmgeglüht W - weichgeglüht G+ - Gleichstrom Pluspol L - lösungsgeglüht St - stabilgeglüht G- - Gleichstrom Minuspol u. abgeschreckt U - ungeglüht W - Wechselstrom N - normalgeglüht V - vergütet					
35 Erstellt durch: TÜV Rheinland Group					
Die Vervielfältigung, die Verbreitung, der Nachdruck und die Gesamtwiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, der vorherigen Zustimmung des Herausgebers vorbehalten.					

*) Herausgeber: Verband der TÜV e.V.

Vertrieb: TÜV-Media GmbH, Am Grauen Stein, 51105 Köln - Unternehmensgruppe TÜV Rheinland Group



Product Data Sheet

G 'Gas-shielded metal-arc welding'

OK Autrod 2509

Prepared by Mete Lindé	Qualified by Christina Skodree	Approved by Mikael Mimer	Reg no EN005920	Canceling EN005080	Reg date 2012-10-28	Page 1 (2)
---------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	--------------------	-----------------------	------------------------	---------------

REASON FOR ISSUE

Mech. data revised

GENERAL

A continuous solid corrosion resisting "Super Duplex" wire for welding of austenitic-ferritic stainless alloys of 25% Cr, 7% Ni, 4% Mo, low C types.

OK Autrod 2509 has high intergranular, pitting and stress corrosion resistance. The alloy is widely used in applications where corrosion resistance is of utmost importance. Pulp & paper industry, offshore and gas industry are areas of interest.

Shielding Gas: I1, I3 (EN ISO 14175)

Alloy Type: Austenitic-ferritic (25 % Cr - 10 % Ni - 4 % Mo - Low C)

CLASSIFICATIONS Wire

SFA/AWS A5.9 ER2504

APPROVALS

Not applicable

CLASSIFICATIONS Wire Electrode

EN ISO 14343-A G 25 9 4 N L

CHEMICAL COMPOSITION

	Wire/Strip (%)	
	Min	Max
C		0.02
Si	0.2	0.5
Mn	0.3	0.7
P		0.025
S		0.030
Cr	24.0	26.0
Ni	9.0	10.5
Mo	3.5	4.5
W		1.0
Cu		0.3
N	0.20	0.30

MECHANICAL PROPERTIES OF WELD METAL

Properties	All Weld Metal	
	As welded	
	Min	Typ
Rp0.2 (MPa)	550	550
Rm (MPa)	650	652
A4-A5 (%)	18	30
Z (%)		80
Charpy V at 23°C (J)		189
Charpy V at -40°C (J)		129



Product Data Sheet

G 'Gas-shielded metal-arc welding'

OK Autrod 2509

Prepared by Mats Lindé	Qualified by Christina Skodree	Approved by Mikael Mimer	Reg no EN005920	Canceling EN005060	Reg date 2012-10-28	Page 2 (2)
---------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	--------------------	-----------------------	------------------------	---------------

ECONOMICS & CURRENT DATA

Dimension (mm)	Current (A)		W	T_1	H		Feed		U	
	Min	Max			Norm	Norm	Min	Max	Min	Max
1.0	80	180	16		1,1	3,1	2,8	3,4	18	24
1.2	180	280	16		2,8	4,6	4,8	5,6	20	28

W = Gas consumption (l / min)

T_1 = Recovery, g weld metal / 100g wire (%)

H = Deposit rate (kg weld metal / hour arc time)

Feed = Feeding rate (m/min)

U = Arc voltage (V)

OTHER DATA

Mechanical data, typical values, are from GTAW of all weld metal.

Welding should proceed with neither too low or too high heat input (general recommendation 0.2-1.5 kJ/mm).

Interpass temperature 100 degr.

Pulsed arc is recommended to obtain optimal welding properties in GMAW.

Typical Ferrite in weld metal: FN 30-50.

7.5 ANEXO V – TABLA DE AGRUPACIÓN DE MATERIALES

De acuerdo con el Informe Técnico UNE-EN ISO-TR15608, los aceros pueden clasificarse, en función de su composición química y propiedades mecánicas, en diferentes grupos o clases para sus aplicaciones de soldeo.

En este anexo, figura la agrupación de los aceros, aspecto que ha de tenerse en cuenta a la hora de desarrollar un procedimiento, para cubrir el mayor número posible de tipos de acero que se pueden soldar con una sola especificación.

Tabla 31. Agrupación de materiales según Informe Técnico UNE-CEN ISO-TR 15608

Grupo	Subgrupo	Tipo de acero
1		Aceros con un límite elástico mínimo especificado $R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$ ^a y con análisis en %: C $\leq 0,25$ Si $\leq 0,60$ Mn $\leq 1,8$ Mo $\leq 0,70$ ^b S $\leq 0,045$ P $\leq 0,045$ Cu $\leq 0,40$ ^b Ni $\leq 0,5$ ^b Cr $\leq 0,3$ (0,4 para fundiciones) ^b Nb $\leq 0,06$ V $\leq 0,1$ ^b Ti $\leq 0,05$
	1.1	Aceros con un límite elástico mínimo especificado $R_{eH} \leq 275 \text{ N/mm}^2$
	1.2	Aceros con un límite elástico mínimo especificado de $275 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 360 \text{ N/mm}^2$
	1.3	Aceros normalizados de grano fino con un límite elástico mínimo especificado $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	1.4	Aceros con resistencia a la corrosión atmosférica mejorada cuyo análisis puede superar los requisitos de los elementos individuales indicados en el grupo 1.
2		Aceros de grano fino tratados termomecánicamente y aceros de moldeo con un límite elástico mínimos especificado $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	2.1	Aceros de grano fino tratados termomecánicamente y aceros de moldeo con un límite elástico mínimo especificado $360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$
	2.2	Aceros de grano fino tratados termomecánicamente y aceros de moldeo con un límite elástico mínimo especificado $R_{eH} > 460 \text{ N/mm}^2$
3		Aceros templados y revenidos y aceros endurecibles por precipitación excepto aceros inoxidables, con un límite elástico mínimo especificado $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	3.1	Aceros templados y revenidos con un límite elástico mínimo especificado $360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 690 \text{ N/mm}^2$
	3.2	Aceros templados y revenidos con límite elástico mínimo especificado $R_{eH} > 690 \text{ N/mm}^2$
4		Aceros aleados Cr-Mo-(Ni) con bajo contenido en vanadio y con Mo $\leq 0,7\%$ y V $\leq 0,1\%$
	4.1	Aceros con Cr $\leq 0,3\%$ y Ni $\leq 0,7\%$
	4.2	Aceros con Cr $\leq 0,7\%$ y Ni $\leq 1,5\%$
5		Aceros al Cr-Mo libres de vanadio con C $\leq 0,35\%$
	5.1	Aceros con $0,75\% \leq \text{Cr} < 1,5\%$ y Mo $< 0,7\%$
	5.2	Aceros con $1,5\% < \text{Cr} < 3,5\%$ y $0,7\% < \text{Mo} \leq 1,2\%$
	5.3	Aceros con $3,5\% < \text{Cr} \leq 7,0\%$ y $0,4\% < \text{Mo} \leq 0,7\%$
	5.4	Aceros con $7,0\% < \text{Cr} \leq 10,0\%$ y $0,7\% < \text{Mo} < 1,2\%$
6		Aceros aleados Cr-Mo-(Ni) con alto contenido en vanadio
	6.1	Aceros con $0,3\% \leq \text{Cr} \leq 0,75\%$, Mo $\leq 0,7\%$ y V $\leq 0,35\%$
	6.2	Aceros con $0,75\% < \text{Cr} \leq 3,5\%$, $0,7\% < \text{Mo} \leq 1,2\%$ y V $\leq 0,35\%$
	6.3	Aceros con $3,5\% < \text{Cr} \leq 7,0\%$, Mo $\leq 0,7\%$ y $0,45\% \leq \text{V} \leq 0,55\%$
	6.4	Aceros con $7,0\% < \text{Cr} \leq 12,5\%$, $0,7\% < \text{Mo} \leq 1,2\%$ y V $\leq 0,35\%$
7		Aceros inoxidables ferríticos, martensíticos o endurecibles por precipitación con C $\leq 0,35\%$ y $10,5\% \leq \text{Cr} \leq 30\%$
	7.1	Aceros inoxidables ferríticos
	7.2	Aceros inoxidables martensíticos
	7.3	Aceros inoxidables endurecibles por precipitación
8		Aceros inoxidables austeníticos Ni $\leq 31\%$
	8.1	Aceros inoxidables austeníticos con Cr $\leq 19\%$
	8.2	Aceros inoxidables austeníticos con Cr $> 19\%$
	8.3	Aceros inoxidables austeníticos al manganeso con $4,0\% < \text{Mn} \leq 12,0\%$
9		Aceros aleados al níquel con Ni $\leq 10,0\%$
	9.1	Aceros aleados al níquel con Ni $\leq 3,0\%$
	9.2	Aceros aleados al níquel con $3,0\% < \text{Ni} \leq 8,0\%$
	9.3	Aceros aleados al níquel con $8,0\% < \text{Ni} \leq 10,0\%$
10		Aceros inoxidables austenítico-ferríticos (Dúplex)
	10.1	Aceros inoxidables austenítico-ferríticos con Cr $\leq 24,0\%$
	10.2	Aceros inoxidables austenítico-ferríticos con Cr $> 24,0\%$
11		Aceros cubiertos en el grupo 1 c excepto $0,25\% < \text{C} \leq 0,5\%$
	11.1	Aceros según se indica en grupo 11 con $0,25\% < \text{C} \leq 0,35\%$
	11.2	Aceros según se indica en grupo 11 con $0,35\% < \text{C} \leq 0,5\%$
	11.3	Aceros según se indica en grupo 11 con $0,5\% < \text{C} \leq 0,85\%$

NOTA: Según el análisis del producto real, los aceros del grupo 2 pueden considerarse como aceros del grupo 1.

a. De acuerdo con la especificación de las normas de productos del acero R_{eH} puede remplazarse por $R_{p0,2}$ o $R_{t0,5}$.

b. Se acepta un valor mayor siempre que $\text{Cr} + \text{Mo} + \text{Ni} + \text{Cu} + \text{V} \leq 0,75\%$.

c. Se acepta un valor mayor siempre que $\text{Cr} + \text{Mo} + \text{Ni} + \text{Cu} + \text{V} \leq 1\%$

7.6 ANEXO VI – POSICIONES DE SOLDEO

En el siguiente anexo se presentan las denominaciones dadas por la normativa europea **UNE-EN ISO 6947** y la normativa americana **AWS A3.0** y **ASME Sec. IX**.

La influencia en la posición de trabajo es clave en el desarrollo del procedimiento. Así pues, las posiciones PA o 1G, que son las más comunes en el soldeo en taller, están lejos de ser las más usuales en la soldadura en campo, donde en la mayoría de ocasiones no se dispone del espacio ni de los medios necesarios para trabajar en tan cómoda posición.

Por otro lado, el aporte térmico también influye en la posición de soldeo, siendo, por lo general, la posición horizontal (PC o 2G) la de menor aporte y la vertical ascendente (PF o 3G ascendente) la de mayor.

ANEXO B (Informativo)

COMPARACIÓN DE LAS DESIGNACIONES INTERNACIONAL, EUROPEA Y ESTADOUNIDENSE

La tabla B.1 proporciona una comparativa entre las posiciones de soldeo comunes mostradas en esta norma internacional y la orientación de la unión mostrada en AWS A3.0⁽⁴⁾ y en ASME Sección IX⁽⁵⁾.

NOTA Este anexo está basado en el Informe Técnico CEN/TR 14633⁽⁶⁾.

Tabla B.1 – Comparación de las designaciones internacional, Europea y Estadounidense para las posiciones de trabajo y de soldeo

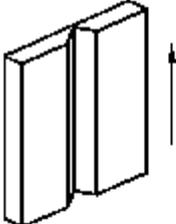
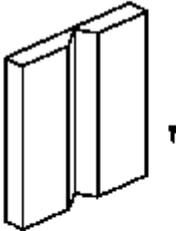
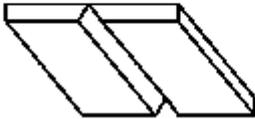
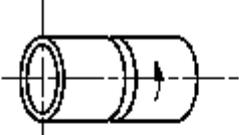
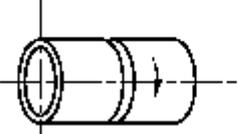
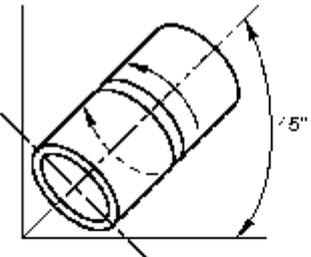
Ilustración	Posición de soldeo de acuerdo con AWS A3.0 ⁽⁴⁾ y ASME Sección IX ⁽⁵⁾	Posición de soldeo de acuerdo con esta norma internacional
 <p>Posición plana (tubo rotando) Posición plana</p>	1G	PA
 <p>Posición horizontal Posición horizontal</p>	2G	PC
 <p>Posición vertical ascendente</p>	3G ascendente	PF

Ilustración	Posición de soldeo de acuerdo con AWS A3.0 ⁽⁴⁾ y ASME Sección IX ⁽⁵⁾	Posición de soldeo de acuerdo con esta norma internacional
 <p>Posición vertical descendente</p>	3G descendente	PG
 <p>Posición bajo techo</p>	4G	PE
 <p>Posición vertical ascendente (tubo fijo)</p>	5G ascendente	PH
 <p>Posición vertical descendente (tubo fijo)</p>	5G descendente	PJ
 <p>Posición inclinada ascendente (tubo fijo)</p>	6G ascendente	H-L045

ISO 6947:2011

- 22 -

AENOR

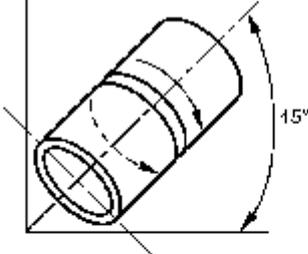
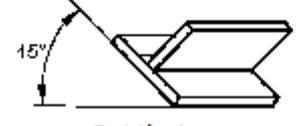
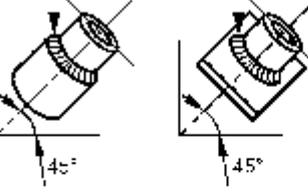
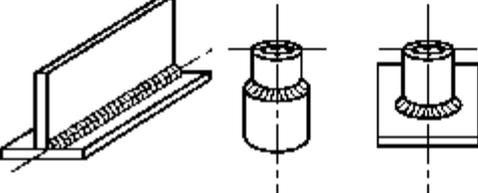
Ilustración	Posición de soldeo de acuerdo con AWS A3.0 ⁽⁴⁾ y ASME Sección IX ⁽⁵⁾	Posición de soldeo de acuerdo con esta norma internacional
 <p>Posición inclinada descendente (tubo fijo)</p>	6G descendente	J-L045
 <p>Posición plana</p>	1F	PA
 <p>Posición plana (tubo rotando)</p>	1FR	PA
 <p>Posición horizontal vertical</p>	2F	PB

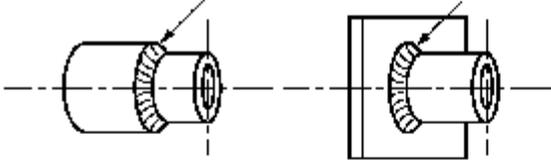
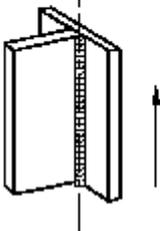
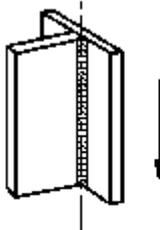
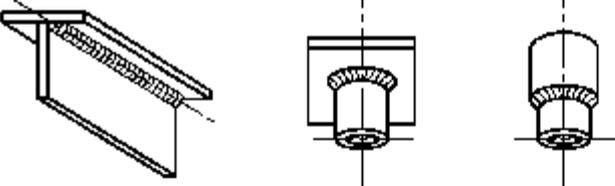
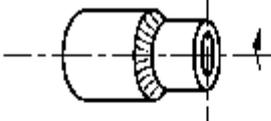
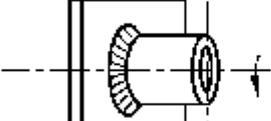
Ilustración	Posición de soldeo de acuerdo con AWS A3.0 ⁽⁴⁾ y ASME Sección IX ⁽⁵⁾	Posición de soldeo de acuerdo con esta norma internacional
 <p>Posición horizontal vertical (tubo rotado)</p>	2FR	PB
 <p>Posición vertical ascendente</p>	3F ascendente	PF
 <p>Posición vertical descendente</p>	3F descendente	PG
 <p>Posición horizontal bajo techo</p>	4F	PD

Ilustración	Posición de soldeo de acuerdo con AWS A3.0 ⁽⁴⁾ y ASME Sección IX ⁽⁵⁾	Posición de soldeo de acuerdo con esta norma internacional
 <p data-bbox="469 719 783 741">Posición vertical ascendente (tubo fijo)</p>	SF ascendente	PH
 <p data-bbox="469 913 783 936">Posición vertical descendente (tubo fijo)</p>	SF descendente	PJ

8 BIBLIOGRAFÍA

AENOR. 2004. *UNE-EN ISO 15607:2003. Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Reglas generales*. Madrid: AENOR.

AENOR. 2005. *UNE-EN ISO 15609-1:2004. Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 1: Soldeo por arco*. Madrid: AENOR.

AENOR. 2005. *UNE-EN ISO 15614-1:2004. Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. Ensayo del procedimiento de soldeo. Parte 1: Soldeo por arco y con gas de aceros y soldeo por arco de níquel y sus aleaciones*. Madrid: AENOR.

AENOR. 2011. *UNE-EN ISO 6947:2011. Soldaduras. Posiciones de trabajo. Definición de los ángulos de pendiente y de rotación*. Madrid: AENOR.

ASME. 2013. *ASME Boiler & Pressure Vessel Code IX. Welding, Brazing and Fusing Qualifications*. New York: ASME. ISBN: 978-0-7918-3475-6

AVESTA. 2004. *The Avesta welding manual. Practice and products for stainless steel welding*. Suecia: Edita Västra Aros. ISBN: 91-631-5713-6

BUREAU VERITAS. 2016. *Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units. NR 216, Ch. 1, Sec. 2: Testing Procedures for Materials*. Paris: Bureau Veritas. [Consulta: agosto de 2016]. Disponible en: erules.veristar.com

BUREAU VERITAS. 2016. *Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units. NR 216, Ch. 5, Sec. 4: Approval of Welding Procedures*. Paris: Bureau Veritas [Consulta: junio de 2016]. Disponible en: erules.veristar.com

CALZADA SÁNCHEZ, A. 2008. *Definición y desarrollo de procedimientos de soldadura en tuberías de aceros inoxidable para un proyecto Offshore*. Proyecto de Fin de Carrera. Universidad de Cádiz.

COLOMBIER, L.; HOCHMANN, J. 1965. *Aceros Inoxidables. Aceros refractarios*. Traducción por José María Demestre Guasch. Bilbao: Urmo.

CONDE Y SANTIAGO, G. 1971. *Aceros inoxidable, refractarios y criogénicos*. Madrid: Interciencia.

DI CAPRIO, G. 1999. *Los Aceros Inoxidables*. Adaptación técnica y traducción por Manuel Forés y Teresa Puig. 2ª ed. Barcelona: Grupinox, D.L. ISBN: 84-8264-145-X

ESAB. 2012. *Consumibles ESAB para aceros inoxidable*. Madrid: ESAB. [Consulta: 25 de agosto de 2016]. Disponible en:

[http://esabsp.esab.net/files/Brochures/Welding%20Consumables/XA%2000156670_Stainles
soverview_ES.pdf](http://esabsp.esab.net/files/Brochures/Welding%20Consumables/XA%2000156670_Stainles%20soverview_ES.pdf)

ESAB. 2012. *Welding duplex stainless steel the ESAB way*. [Consulta: 22 de agosto de 2016].
Disponible en: <http://www.esab.com/gb/en/support/upload/Duplex-Stainless-Steel.pdf>

IMOA. 2012. *Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex*.
Traducción por Germán Hernández Riesco y José R. Ibars Almonacil. Londres: IMOA. ISBN:
978-1-907470-02-8

VALIENTE BERMEJO, M.A. [et al.]. 2015. Effect of shielding gas on welding performance
and properties of duplex and superduplex stainless steel welds. *Weld World*, 59(2), pp. 239
– 249. ISSN: 0043-2288. DOI: 10.1007/s40194-014-0199-7. Disponible en:
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40194-014-0199-7>

VALIENTE BERMEJO, M.A. [et al.]. 2015. Effect of welding position on properties of dúplex
and superduplex stainless steel circumferential welds. *Weld World*, 59(5), pp. 693 – 703.
ISSN: 0043-2288. DOI: 10.1007/s40194-015-0245-0. Disponible en:
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40194-015-0245-0>