

PROGRAMA ASTURIAS 2016-2017

RESULTADOS DEL PROYECTO:

**PUESTA A PUNTO DEL SERVICIO PARA LA DETERMINACIÓN DE
HIDRÓGENO DIFUSIBLE EN METALES FERRÍTICOS SOLDADOS POR ARCO**

REFERENCIA Nº: IDI/2016/000296

Entidad Beneficiaria:



Fecha inicio: 01/07/2016

Fecha fin: 31/10/2017

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se plantea con el objetivo de poner en funcionamiento un método de determinación de la cantidad de hidrógeno incorporado en los procesos de soldadura mediante el uso de arco eléctrico. Durante este tipo de operaciones el hidrógeno presente en la atmósfera del arco se puede incorporar por difusión en el cordón de soldadura pudiendo generar perjuicios en la estructura soldada como, por ejemplo, agrietamientos.

2. OBJETIVOS

El principal objetivo fijado en este proyecto es la puesta a punto de un método para la determinación de hidrógeno en metales ferríticos soldados por arco, para lo cual se plantean los siguientes objetivos específicos:

- 1- Diseño de los procedimientos de soldadura y útiles de acuerdo a la norma UNE EN ISO 3690.
- 2- Fabricación y puesto a punto del equipo de medición.
- 3- Calibración y puesto a punto del método de análisis.

3. ACTIVIDADES REALIZADAS

H1: FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE ENSAYO

Las pruebas de soldadura que se han de realizado en este proyecto, incluyen la evaluación de consumibles de soldeo para Arco sumergido (SAW), electrodo revestido (SMAW) y Hilo Tubular (FCAW). Se siguieron las indicaciones de fabricación de probetas de ensayo establecidas en la norma UNE ISO 3690, para cada uno de los tres casos analizados. En las tareas de este hito se indican las acciones realizadas para establecer un procedimiento de ensayo sólido que reprodujera las indicaciones de la norma comentada. Se realizaron las siguientes acciones

- 1) Definición y fabricación de probetas de ensayo en acero.
- 2) Diseño y fabricación de las plantillas y moldes donde se montan los cupones soldados y con los que se mantengan las condiciones de enfriamiento de acuerdo a las indicaciones de la norma para cada uno de los 3 procesos mencionados
- 3) Definición de procedimientos de soldadura para cada tipo de tecnología de soldadura y formato de consumible.
- 4) Procedimiento de enfriamiento y mantenimiento de las muestras hasta la evaluación de su hidrogeno difusible.

T1.1 Diseño y fabricación de moldes para el soldeo

Siguiendo las indicaciones de la norma ISO 3690 se procedió a realizar el diseño de los moldes para enfriamiento controlado durante los procesos de soldeo. En la Figura 1 se muestra un modelo de molde en cobre de la propia norma, cuya aplicación debería restringirse para energías de calentamiento que van hasta los 2 kJ/mm (apto por tanto para los proceso de soldadura de SMAW).

El diseño en cualquier caso debería ser concebido para asegurar la correcta alineación y sujeción de las probetas durante el soldeo, mediante un dispositivo de sujeción único, regulable en anchura de probeta mediante un tornillo u otro elemento de fijación. En la Figura 2 y en la Figura 3 se incluye el molde de cobre para bajo input térmico diseñado y fabricado durante esta tarea en el taller de mecanizado de ITMA. Este molde se realizó en cobre y se le instaló un tornillo de apriete para el perfecto alineamiento de las probetas durante el proceso de soldadura. En la Figura 3. Moldes de Cobre aplicable a heat inputs hasta 2kJ/mm. Diseño y fabricado en ITMA. Detalle de flejes en los laterales del bloque. se incluye el detalle de los flejes laterales consumibles, cuyo objeto es la protección térmica del bloque durante la soldadura, protección contra salpicaduras y proyecciones.

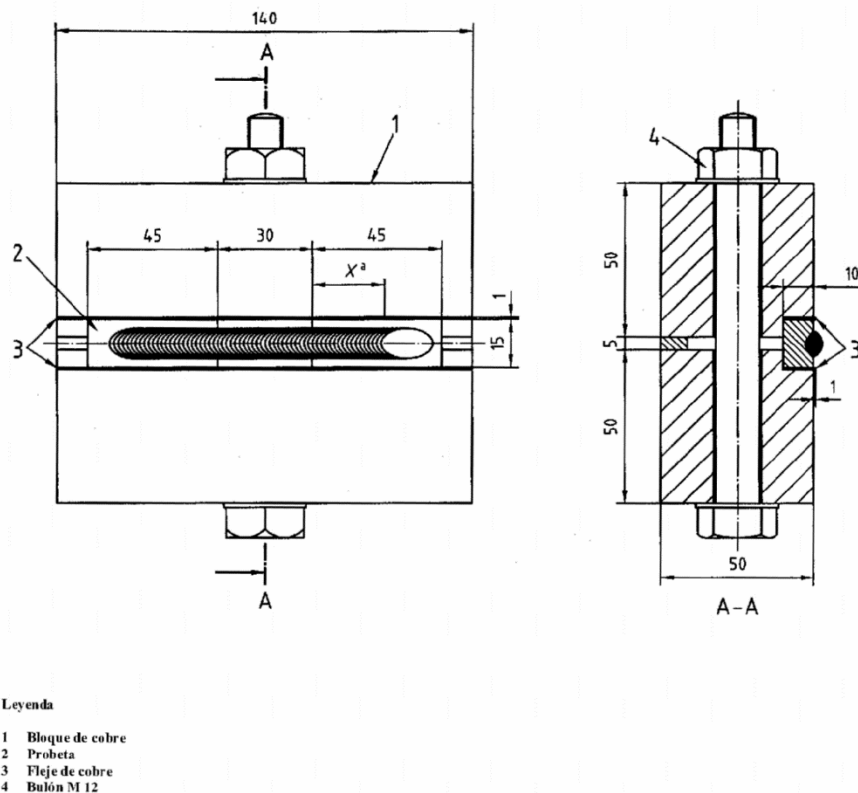


Figura 1. Indicaciones de la norma ISO 3690, para la fabricación de moldes de Cobre aplicables a heat inputs hasta 2kJ/mm.

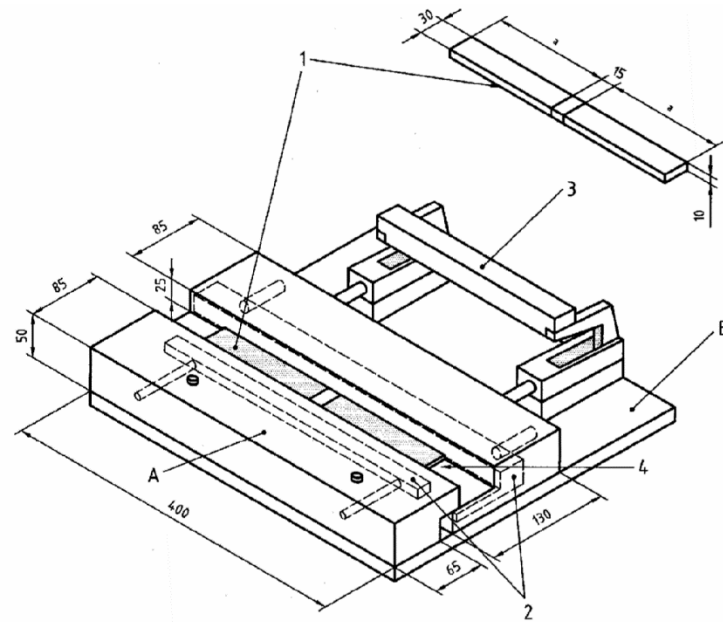


Figura 2. Moldes de Cobre aplicable a heat inputs hasta 2kJ/mm. Diseñado y fabricado en ITMA.



Figura 3. Moldes de Cobre aplicable a heat inputs hasta 2kJ/mm. Diseñado y fabricado en ITMA. Detalle de flejes en los laterales del bloque.

Para las soldaduras con procesos tipo SAW y FCAW, fue necesaria la fabricación de un molde de cobre, en este caso con una refrigeración interna de agua, que permitiera la evaluación del calor requerida por norma. En la Figura 4, se incluye el diseño de la acuerdo a norma que permite la ejecución de las soldaduras dc ensayo con una energía de calentamiento superior a los 2 kJ/mm y limitada a aproximadamente 3 kJ/mm.



Leyenda:

- 1 Probeta
- 2 Enfriamiento por agua
- 3 Mordaza de palanca
- 4 El fleje de cobre se inserta aquí
- A Fabricado en cobre
- B Fabricado en acero blando

Figura 4 Moldes de Cobre aplicable a heat inputs hasta 3kJ/mm. Diseñado y fabricado en ITMA.

ITMA.

En el caso del molde para inputs térmicos entre 2 y 3 kJ/mm nos encontramos con la problemática de tener que ejecutar un diseño de canales internos de agua dentro de las piezas para poder evacuar el calor en las condiciones establecidas por la norma. En la Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8, se incluyen los diseños realizados en Autocad tanto del montaje final como de las piezas que constituyen este sistema de amarre.

Conjunto

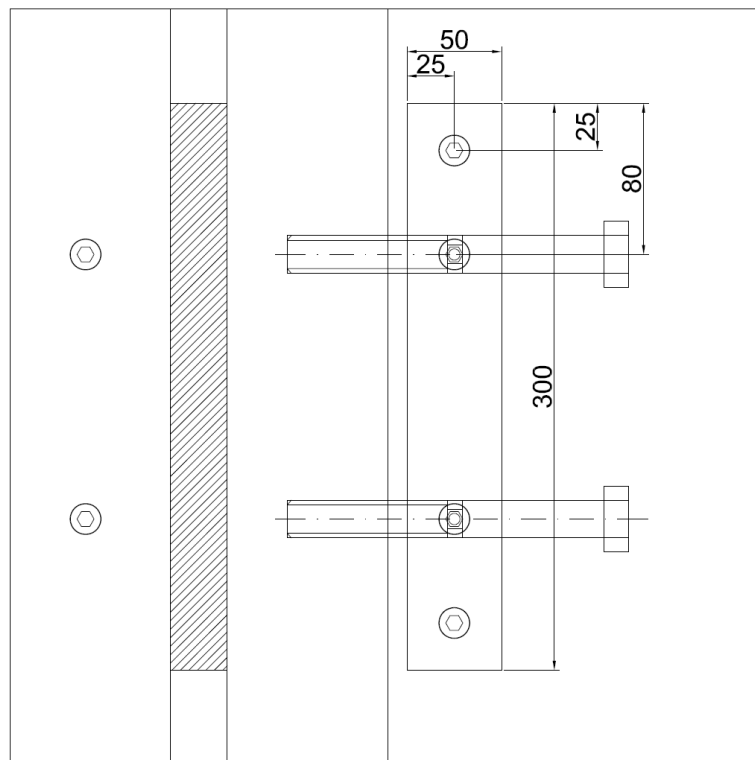
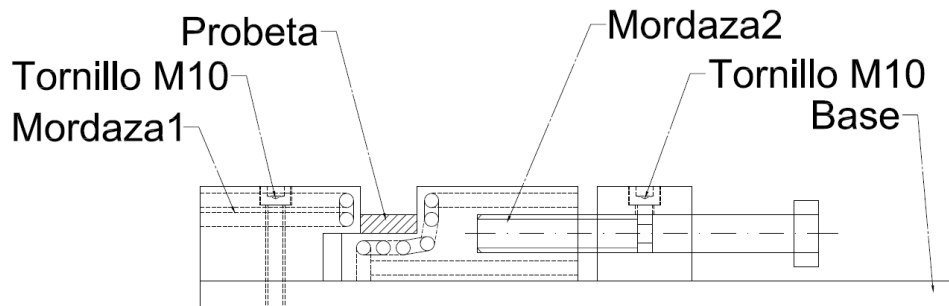


Figura 5 Diseño ITMA en detalle del Molde de Cobre aplicable a heat inputs hasta 3kJ/mm.

Mordaza 1/Cobre

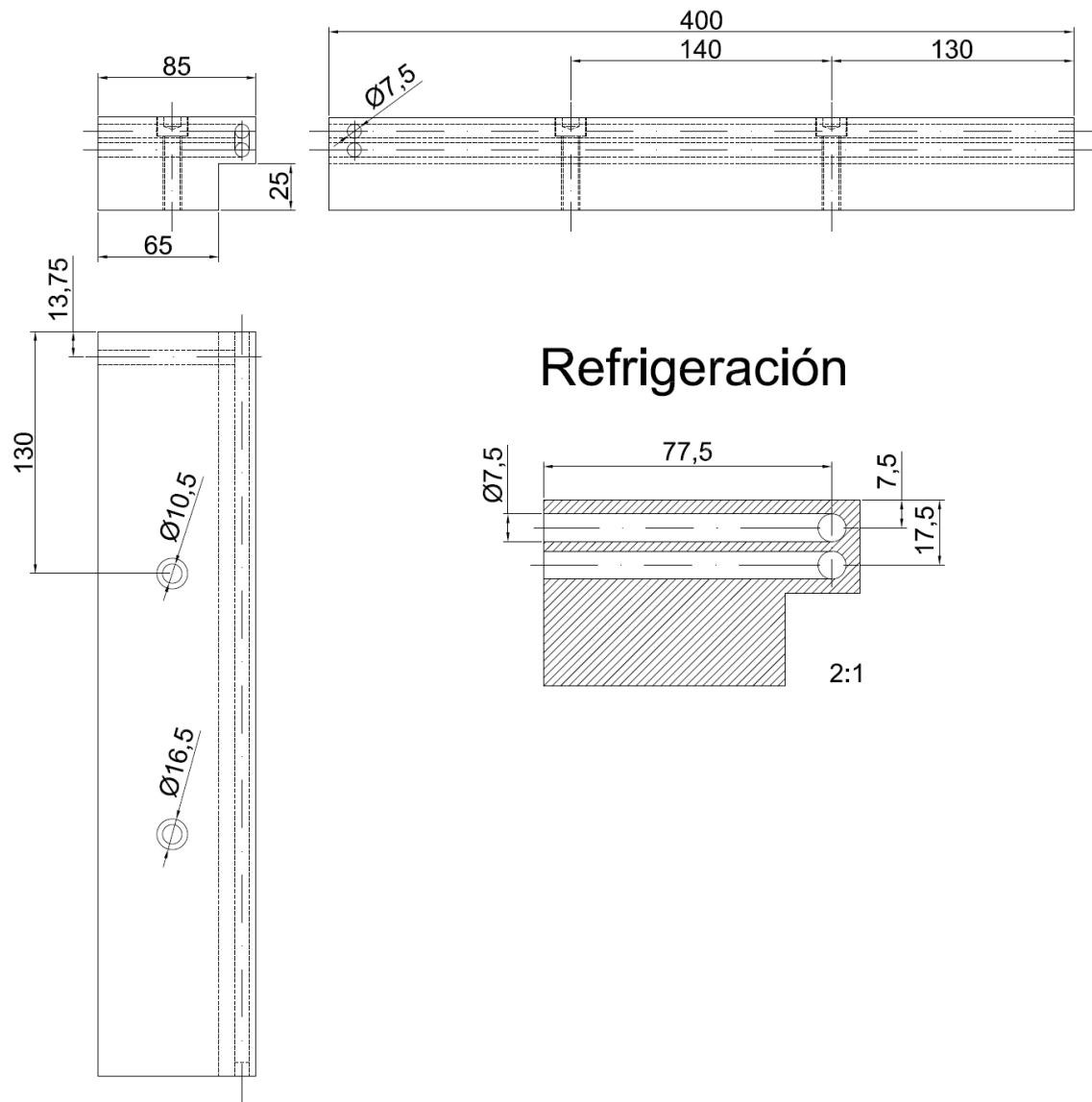


Figura 6 Diseño ITMA en detalle del Molde de Cobre aplicable a heat inputs hasta 3kJ/mm. Detalle de mordaza 1.

Mordaza2/Cobre

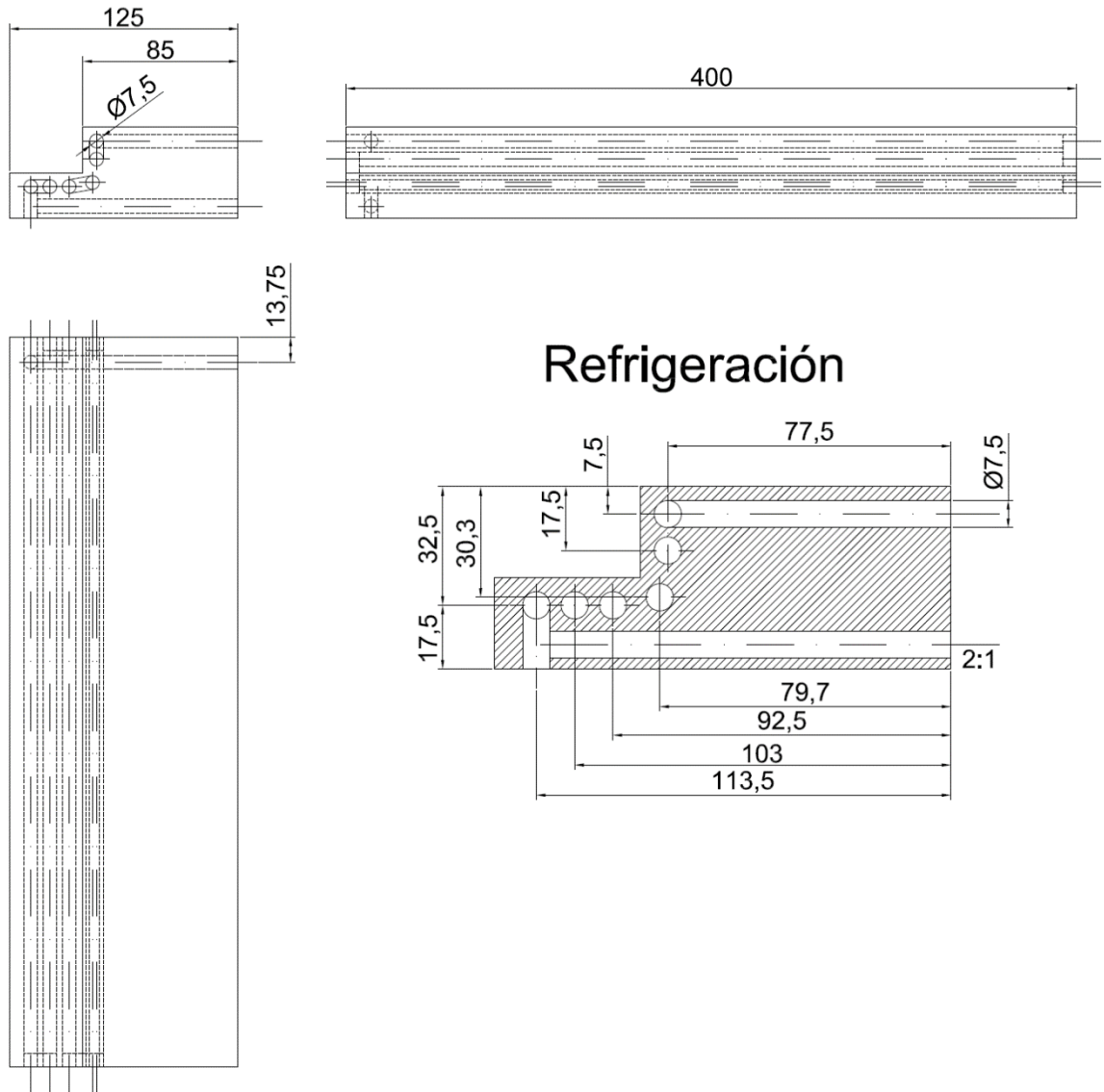


Figura 7 Diseño ITMA en detalle del Molde de Cobre aplicable a heat inputs hasta 3kJ/mm. Detalle de mordaza 2.

Base/Acero/1

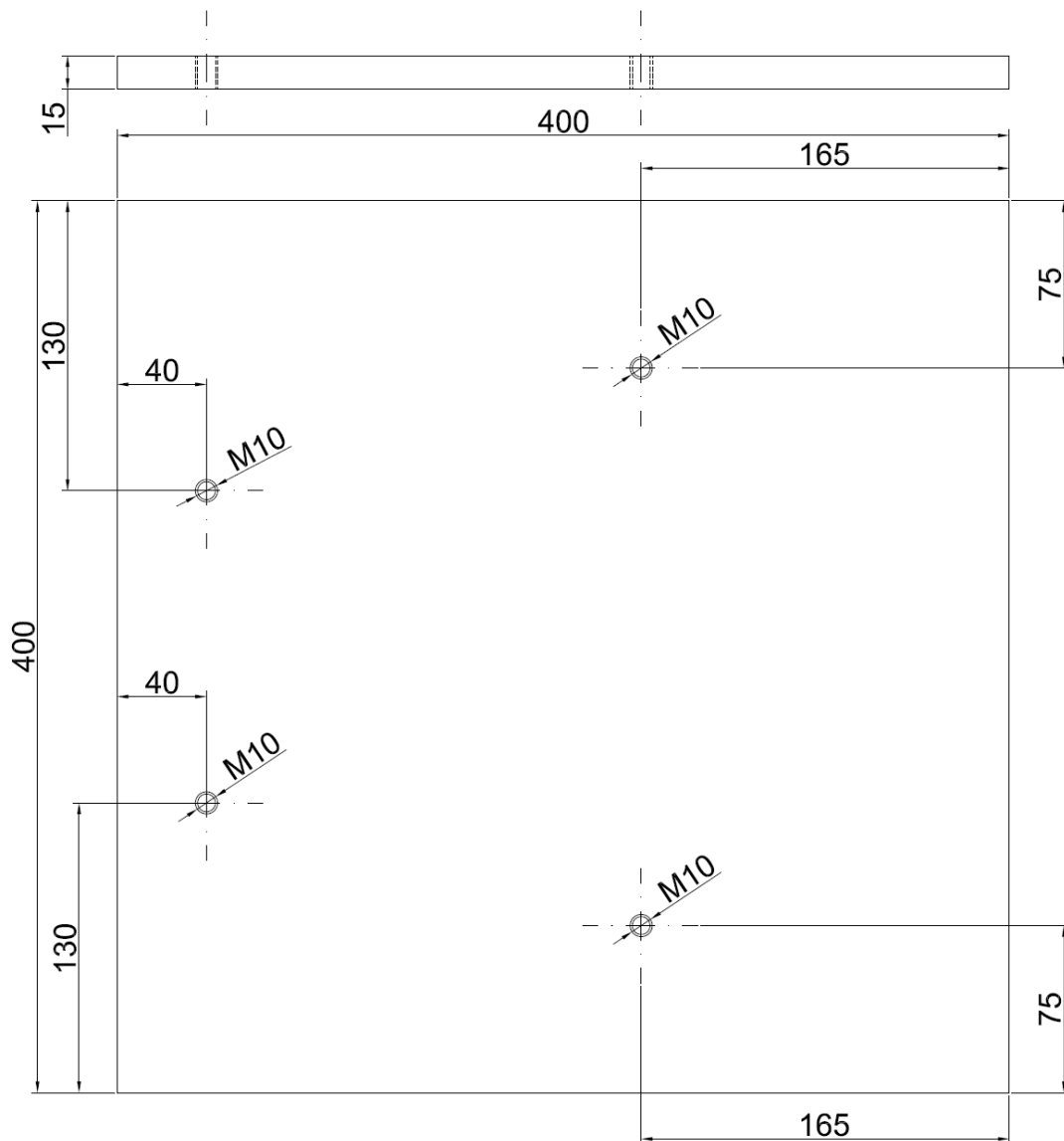


Figura 8 Diseño ITMA en detalle del Molde de Cobre aplicable a heat inputs hasta 3kJ/mm. Detalle de Base acero.

Una vez realizado el diseño se procedió a la fabricación de las distintas partes del molde de cobre, en la Figura 9 y la Figura 10 se incluyen las fotografías después del proceso de fabricación en las instalaciones de ITMA.



Figura 9 Fabricación del Molde de Cobre aplicable a heat inputs hasta 3kJ/mm. Detalle de entradas y salidas de refrigeración.



Figura 10 Diseño ITMA en detalle del Molde de Cobre aplicable a heat inputs hasta 3kJ/mm. Detalle de Base acero. Detalle de entradas y salidas de refrigeración.

Adicionalmente dentro de esta tarea se fabricaron las probetas para las pruebas de soldadura y enfriamiento en los procesos, GTAW, SAW y FCAW.

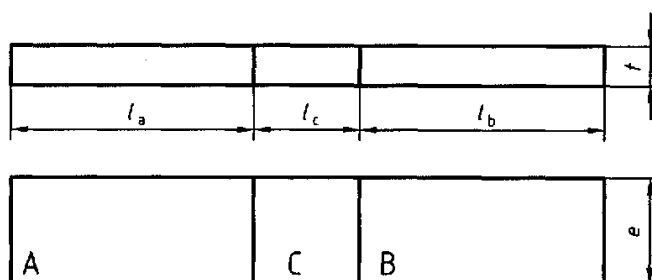
Las probetas para las pruebas de soldadura se prepararon con un acero estructural al carbono no efervescente con un contenido en carbono no superior a 0,18% y un contenido en azufre no superior a 0,02%, según las indicaciones de la norma. En concreto se utilizó un acero tipo S355J2+N con propiedades químicas recogidas en la Tabla 1. El análisis químico se ha realizado en los laboratorios de ITMA. El S355J2+N se emplea para piezas de resistencia media-alta, buena tenacidad y un fácil conformado (curvado, plegado, etc). Es soldable y se utiliza básicamente para

elementos de máquinas que exijan poca responsabilidad. Además presenta requisitos de resiliencia a -20°.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
0.17	0.03	1.6	0.04	0.04

Tabla 1 Análisis químico realizado en ITMA para Chapa base de las probetas. Cumple con las especificaciones técnicas requeridas en ISO 3690.

Sobre este material se realizaron 9 probetas, 3 para cada tipo de proceso según la Figura 11, extraída de la norma en cuestión.



Medidas en milímetros					
Probeta		$l_a = l_b$	l_c	e	t
Figura 1		45	30	15	10
Figura 2	Apartado 3.2.2	135	15	30	10
	Apartado 3.2.3	85	15	30	10
A/B	Apéndices de entrada y salida de la probeta				
C	Parte central de la probeta				
NOTA - La parte central de la probeta tiene las mismas medidas en los tres casos.					

Figura 11 Detalles dimensionales de las probetas de prueba fabricadas en ITMA.

A continuación se indican las dimensiones de las probetas para cada proceso:

Numero probeta	Proceso soldadura	La=Lb (mm)	Lc (mm)	e (mm)	t(mm)	Peso (g)
1-1	SMAW	45.03	30.01	15.01	10.05	40.01
1-2	SMAW	45.05	30.02	15.03	10.04	40.05
1-3	SMAW	45.08	30.01	15.02	10.05	40.07
2-1	SAW	135.02	15.05	30.02	10.05	40.08
2-2	SAW	135.02	15.04	30.04	10.06	40.05
2-3	SAW	135.03	15.04	30.08	10.04	40.06
3-1	FCAW	85.02	15.02	30.02	10.05	40.05
3-2	FCAW	85.04	15.03	30.03	10.03	40.06
3-3	FCAW	85.05	15.03	30.04	10.04	40.07

Tabla 2 Dimensiones de las probetas de acero S355J2+N para ensayo de soldadura

De acuerdo con las medidas registradas en la Tabla 2, todas las probetas cumplieron con la tolerancia establecida por norma de $\pm 0,25$ mm sobre todas las Figura 11, extraída de ISO 3690.

Adicionalmente se comprobó que todas las superficies acababan en ángulo recto, para asegurar un buen contacto entre las piezas adyacentes del molde de cobre, durante la operación de soldeo. Cada probeta se mecanizó mediante corte por agua y fresado de las superficies, para obtener una anchura uniforme. Se prepararon por tanto tres juegos de 3 probetas cada uno, numerándose por grabado en el lado opuesto al utilizado para la soldadura. Adicionalmente se desengrasaron con acetona antes de la pruebas de soldadura. Las muestras centrales se calentaron a hasta la temperatura de 650°C con un tiempo de mantenimiento de 1 hora en una mufla con atmosfera controlada de Nitrógeno, con objeto de eliminar cualquier traza de gas inherente al propio acero. Tras esta operación y una vez que las probetas se encontraron a temperatura ambiente, se determinó el peso de cada parte central (dimensiones $L_c \times t \times e$) con una balanza de precisión 0,01 g. Las mediciones de la masa de las probetas se adjuntan en la Tabla 2 anterior.

T1.2 Procedimiento de soldadura y control del enfriamiento.

La temperatura del montaje de soldeo antes de cada operación de soldadura se fijó en la temperatura ambiente acotada en $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para las posteriores pruebas de soldadura de hito H2, se registró esta temperatura con termopar de contacto sobre la probeta de acero.

Como procedimiento general de soldadura se definieron los siguientes puntos como guía para las operaciones de soldadura del hito 2:

- Para cada uno de los tres procesos se efectuó un único cordón de soldadura sobre la probeta fijada en el montaje de soldeo sobre el molde de la Figura 3, para el caso de las pruebas con SMAW, y sobre el molde la figura 4, para las pruebas sobre SAW y FCAW. La ejecución de las pruebas finales se detalla en el Hito 2.
- Las pruebas de soldadura se iniciaron en cada uno de los casos sobre el apéndice de entrada en un punto alejado 25 mm del extremo de la parte central de la probeta. De esta forma se pudo asegurar tanto un arco como una morfología de cordón de soldadura, estable en cada caso, antes de llegar a la parte central donde se realizaría posteriormente el análisis químico de hidrogeno. La ejecución de las pruebas finales se detalla en el Hito 2.
- Las pruebas de soldadura se terminaron con el final de la cresta del cordón situado a menos de 25 mm del centro de la probeta.
- Para el procedimiento de enfriamiento, después de extinguirse el arco, y sin ningún retraso, se soltaron las piezas soldadas del montaje, se retiraron y templaron inmediatamente sumergiendo la probeta en probeta en agua. Con estas operaciones y para que las probetas alcanzaran una temperatura inferior a la de temperatura ambiente, se introdujeron las muestras en un baño a baja temperatura con nitrógeno líquido. En la Figura 12 y Figura 13, se muestran detalles de una probeta realizada con SMAW en agua y posteriormente en nitrógeno, siguiendo el procedimiento diseñado en esta tarea.



Figura 12 Procedimiento de temple con agua de una probeta tras soldadura con SMAW.

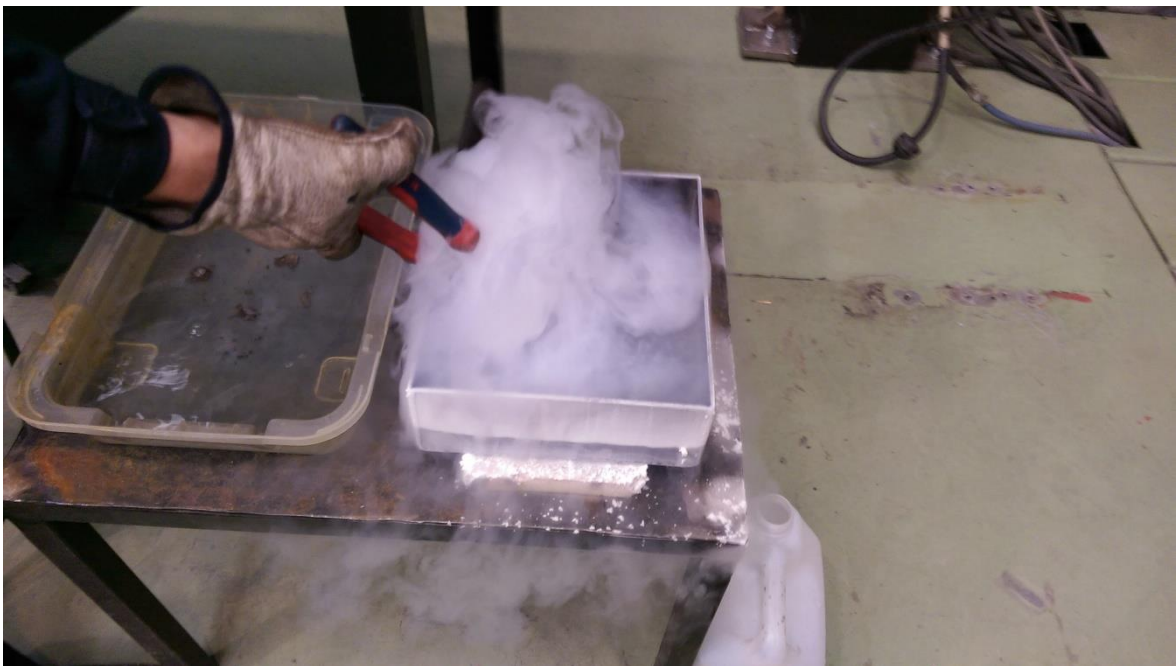


Figura 13 Procedimiento enfriamiento con nitrógeno líquido de una probeta tras soldadura con SMAW.

- Una vez enfriadas, las caras inferiores de la parte central de las probetas debían ser examinadas para verificar la uniformidad y la extensión de la coloración debida al calor producido por la soldadura. Las probetas correctamente alineadas y sujetas debían presentar una coloración paralela y uniforme, sobre la cara inferior de la parte central de la probeta y la oxidación de color oscuro no debía extenderse hasta los bordes de la cara inferior de la parte central de la probeta.

- En términos generales, una vez que las probetas estuvieron a temperatura ambiente, se procedió a retirar la escoria, cortar los apéndices de entrada y salida y después volver a almacenar en frío la parte central de la probeta, hasta el análisis químico. Las partes centrales de las probetas se pueden almacenar antes del análisis $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ en nitrógeno líquido durante varias semanas, si fuera necesario. En la Figura 14 se muestra una de las probetas tras la soldadura donde se están retirando los apéndices mediante corte por sierra.



Figura 14 Procedimiento de corte por sierra de apéndices tras enfriamiento con nitrógeno líquido de una probeta tras soldadura con SMAW.

En la Figura 15 se observa el almacenamiento en nitrógeno líquido de una de las probetas soldadas con SMAW.



Figura 15 Procedimiento de almacenamiento en nitrógeno líquido de una probeta (zona central) tras soldadura con SMAW

Todas las informaciones relativas al soldeo tales como la corriente, la tensión, la velocidad de soldeo, el tipo del metal de aportación etc., se registraron en documentos tipo PQR (registro de procedimiento de soldadura). Se consideró importante registrar la temperatura y la humedad atmosférica en el puesto de soldadura con equipos calibrados del laboratorio de ITMA, siendo estos datos consignados con los resultados del análisis.

H2: PROCEDIMIENTO DE SOLDEO PARA REALIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE SOLDADURA

Para el procedimiento de soldeo de cada proceso en estudio, los parámetros se definieron de forma que permitieran la realización de un cordón de soldadura único sobre la morfología de probetas descritas en el hito anterior.

A continuación se describen las particularidades de cada una de las pruebas realizadas para ajustar los procedimientos de soldadura en cada proceso.

T2.1 Procedimiento de soldadura manual al arco con electrodo revestido.

Sobre los electrodos de acero al carbono seleccionados para las pruebas de soldadura, tipo E7018, se aplicó un tratamiento térmico de secado en mufla siguiendo las instrucciones del fabricante de electrodos, que en este caso determinó un intervalo de temperatura de entre 300 °C a 350 °C durante 3 horas. Se utilizó un valor de temperatura de 325°C intermedio.

Los electrodos cuyo revestimiento estuviera fisurado o roto se descartaron para el análisis y los electrodos que finalmente fueron sometidos al ensayo de prueba, fueron tomados de un paquete recién abierto que no estuviera dañado. Durante todo el tratamiento de secado los electrodos no estuvieron en contacto con la pared del horno, tal y como se ve en la Figura 16, donde se aprecian los electrodos colocados en una bandeja del horno mufla de ITMA para consumibles de soldadura:



Figura 16 Calentamiento de electrodos en mufla previo a las operaciones de soldeo.

Durante toda la operación de secado en horno debe utilizarse un horno calibrado y los electrodos tienen que pasar la totalidad del tiempo especificado a la temperatura de secado. Durante este periodo de tiempo en el horno hay que colocar solamente los electrodos sometidos al ensayo.

Cuando se termina la operación de secado por calentamiento se debe enfriar el electrodo a la temperatura ambiente, para ello se realizan las siguientes operaciones:

- En una estufa portátil de electrodos (equipo de ITMA, ver Figura 17) se trasladan los electrodos una estufa de cultivos en el laboratorio de electroquímica de la Fundación (ver Figura 18). Esta estufa, permite controlar temperatura, humedad y adicionalmente es estanca. Se determinó por tanto que los electrodos se trasladasen desde la mufla de calentamiento hasta la estufa de cultivos, mediante la estufa portátil, permitiendo así el enfriamiento hasta temperatura ambiente en una atmosfera controlada de baja humedad, en el entorno estanco que permite la estufa de cultivos. Se determinó por tanto que la adecuación a la norma de estas operaciones era más apropiada que diseñar y fabricar una cámara estanca sin control de temperatura y humedad.

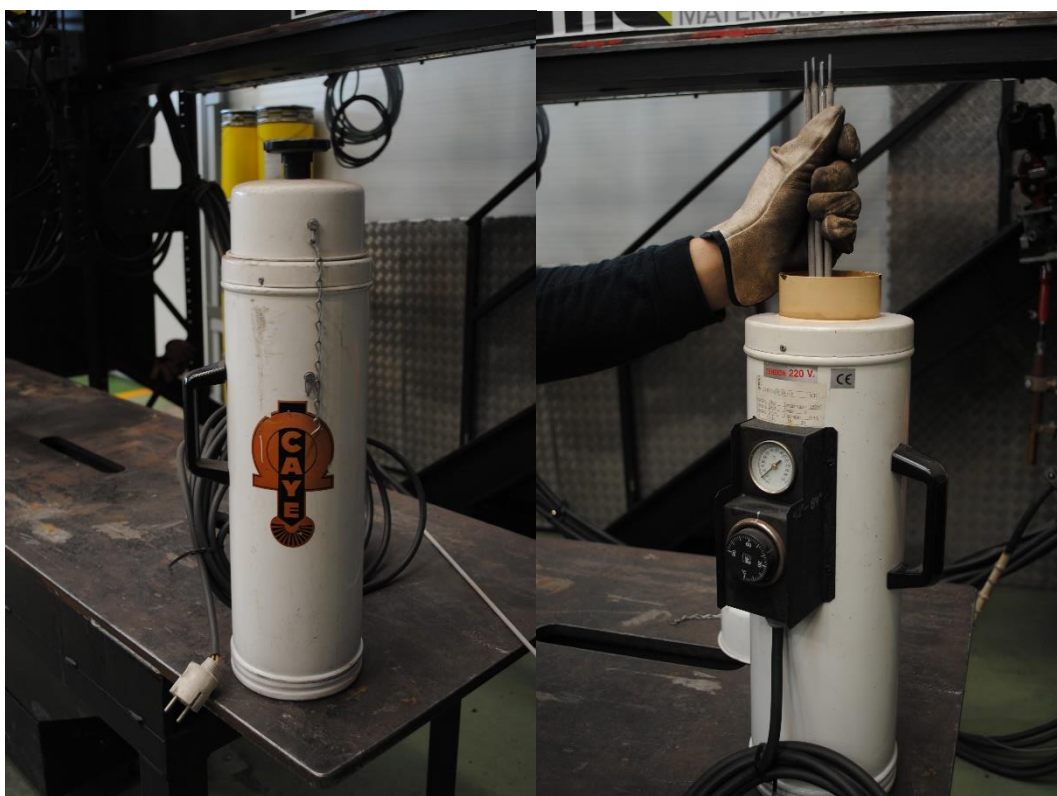


Figura 17 Traslado de electrodos desde mufla a estufa de cultivos mediante estufa de electrodos portátil.



Figura 18 Estufa de cultivos para enfriamiento en atmosfera estanca.

Se debe utilizar el electrodo tan pronto como sea posible después de haber alcanzado la temperatura ambiente. Todo electrodo retirado del horno y no utilizado inmediatamente no debe ser secado de nuevo en horno ni posteriormente sometido a ensayo.

Para la realización de las soldaduras de ensayo se utilizó un montaje en cobre como se representa en la figura 1 de la norma, para el alineamiento y sujeción de la probeta con partes centrales de la misma de medidas 15 mm x 10 mm x 30 mm. En la Figura 19 se incluye una fotografía del proceso de preparación de la probeta 1-1 de soldadura para electrodo.



Figura 19 Pruebas de soldadura con electrodos revestidos en plantas piloto de soldadura de ITMA.

Para las pruebas de electrodos se seleccionó electrodos revestidos de tipo E7018 con 4 mm de diámetro. Las pruebas de soldadura se realizaron con la intensidad de la corriente de soldeo 15 A menor que la intensidad máxima indicada por el fabricante, y mantenida con una tolerancia de \pm

10 A. En este caso se tomó la intensidad máxima de 300A, por lo que las soldaduras se hicieron a 285A.

Se efectuaron tres pruebas de soldadura, probetas 1-1, 1-2 y 1-3 sobre diferentes probetas, utilizando un electrodo diferente para cada una (ver registro de procedimiento). La aportación realizó sin balanceo según el eje de la probeta. No se efectuó ningún cebado previo antes del ensayo. La longitud del depósito sobre el apéndice de entrada fue en cada caso 25 mm. El final de la cresta de cada uno de los cordones de soldadura se encontró sobre el apéndice de salida a 25 mm de la parte central de la probeta. Cuando terminaron las soldaduras de las pruebas 1-1 a 1-3 se procedió a enfriarlas rápidamente y a almacenarlas como se describe en el apartado anterior.

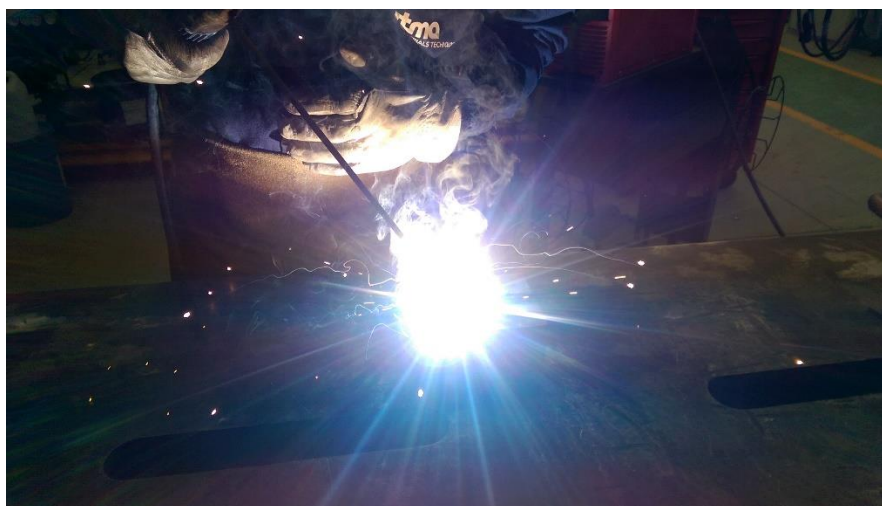


Figura 20 Pruebas de soldadura con electrodos revestidos en plantas piloto de soldadura de ITMA

En la Figura 20 se muestra la ejecución de las pruebas de soldadura por parte de personal de ITMA en las plantas Piloto de la Fundación.

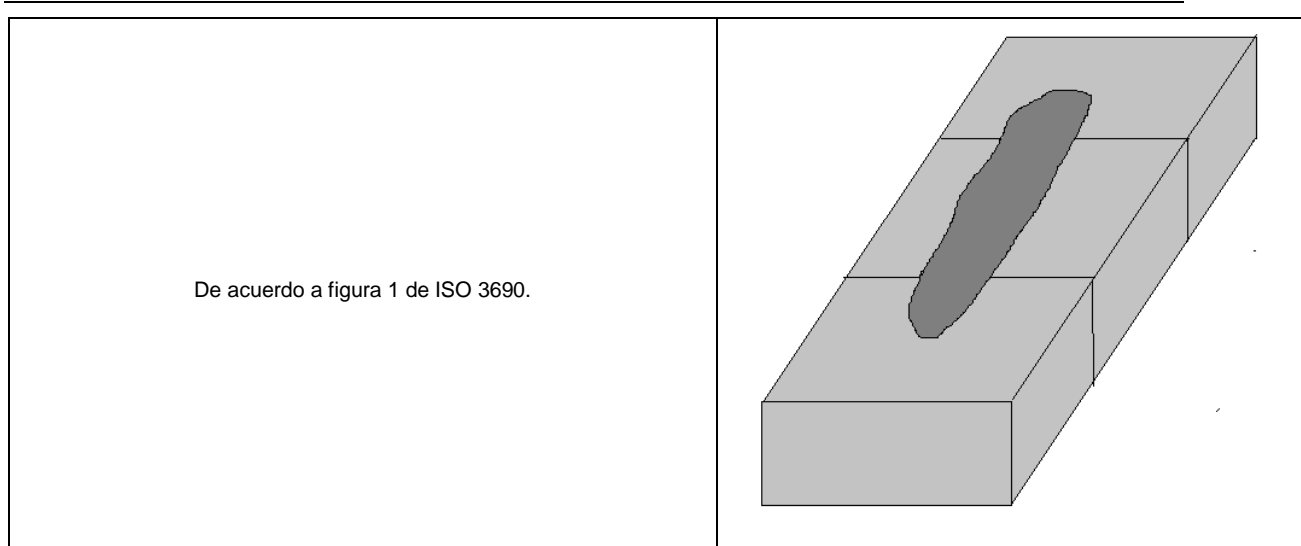
A continuación se incluyen en las siguientes tablas, con formato de procedimiento de soldadura, las variables esenciales asociadas a las probetas 1-1 a 1-3.

DATOS DEL FABRICANTE / MANUFACTURER DATA

Empresa: <i>Company:</i>	ITMA	Lugar: <i>Location:</i>	Avilés (ASTURIAS)
Coordinador de soldadura: <i>Welding coordinator:</i>	Ricardo Alvarez	Nombre del soldador: <i>Welder name:</i>	Juan Lopez
WPS Nº: <i>WPS Nº:</i>	SMAW-11	Fecha de soldeo: <i>Test date:</i>	06/11/2016

MATERIAL BASE / PARENT MATERIAL

De designación (colada): <i>From designation (Heat):</i>	S355J2+N	A designación (colada): <i>To designation (Heat):</i>	---
De grupo (ISO/TR 15608): <i>From group (ISO/TR 15608):</i>	1.2	A grupo (ISO/TR 15608): <i>To group (ISO/TR 15608):</i>	---
Espesor: <i>Thickness:</i>	10	Espesor: <i>Thickness:</i>	--
Diámetro exterior: <i>Outside diameter:</i>	---	Diámetro exterior: <i>Outside diameter:</i>	---
DISEÑO / DESIGN		SECUENCIA DE SOLDEO / WELDING SEQUENCE	


DETALLES DE LA UNIÓN / JOINT DETAILS

Tipo de unión: Joint type:	Cordón de recargue	Tipo de soldadura: Welding type:	Soldadura a recargue
Preparación y limpieza: Preparation & cleaning:	Corte por agua y mecanizado	Limpieza entre pasadas: Interpass cleaning:	---
Respaldo (material): Backing (material):	Si metal base	Gas de respaldo (caudal): Backing gas (flow rate):	No
Resanado (método): Back gouging (method):	No	Profundidad de resanado: Back gouging deep:	No
Pasadas (por lado): Pass (per side):	Simple	Posición de soldeo: Welding position:	PA

MATERIALES DE APORTACIÓN / FILLER MATERIALS

Marca (nº lote): Trade Mark (lot nº):	SUPERCITO 7018S	Designación: Designation:	EN ISO 2560-A: E 42 5 B 32 H5 AWS A5.1: E7018-1
Fabricante: Manufacturer:	OERLIKON	Manipulación: Handling:	De acuerdo a fabricante

GAS DE PROTECCIÓN / SHIELDING GAS

Composición (marca): Composition (trade mark):	N.A.	Designación: Designation:	-
Caudal (l/min): Flow rate (l/min):	-	Diámetro de la boquilla (mm) : Gas cup size (mm):	-

PARÁMETROS DE SOLDEO / WELDING PARAMETERS

Probeta Specimen	Proceso Process	Tamaño metal aportación Filler metal size (mm)	Corriente Current			Temp eratur a °C	Humedad	Velocidad avance Travel speed (cm/min)	Aporte térmico Heat input (KJ/mm)
			Amperios Amps	Voltios Volts	Tipo y polaridad Type & polarity				
PA	1-1	111	Ø4	285	27	24	80%	25	1,5
	1-2		Ø4	285	27			25	1,5
	1-3		Ø4	285	27			25	1,5
			Ø4	285	27			25	1,5

PRECALENTAMIENTO (EN ISO 13916) / PREHEATING (EN ISO 13916)

Temperatura precalentamiento: Preheat temperature:	24°C	Temperatura entre pasadas: Interpass temperature:	---
Mantenimiento de temperatura: Temperature holding:	-	Sistema de calentamiento: Heat system:	Llama oxiacetilénica

TÉCNICA DE SOLDEO / WELDING TECHNIQUE

Nº de cordón Bead Nº	Proceso de soldeo Welding process	Tipo de proceso Process type	Parámetros de oscilación (si procede) Oscillation parameters (if applicable)					
			Manual / Semiautomático Manual / Semiautomatic		Mecanizado / Automático Mechanized / Automatic			
			Tipo de pasada (ancho) Pass type (width)		Tipo de pasada Pass type	Frecu encia	Tiempo de parada entre pasadas	

						Freque ncy	Interbeads stop time
PA	Todos	111	Manual	Recta			

FABRICANTE:
MANUFACTURER:

ORGANISMO EXAMINADOR:
EXAMINING BODY:



Avilés, a 06 de Noviembre de 2016

Ricardo Álvarez Fernández
EWE-ES 425

**Registro de cualificación de procedimiento de soldeo (WPQR) según UNE-EN ISO 15614-1:2004
con la colaboración de FUNDACIÓN ITMA**
UNE-EN ISO 15614-1:2004 Welding Procedure Qualification Record (WPQR) with FUNDACIÓN ITMA collaboration

Tabla 3 Parámetros de soldadura para 1-1, 1-2, 1-3 pruebas de soldadura con SMAW.

T2.2 Procedimiento de soldadura para arco sumergido.

Para las pruebas de arco sumergido, el diámetro del hilo de aportación utilizado para el proceso de soldeo al arco sumergido está relacionado con la corriente utilizada y con el tamaño del cordón de soldadura. Para este procedimiento se utilizaron corrientes altas y en consecuencia se produjeron cordones anchos a partir de diámetros de hilo de 4 mm. Por consiguiente, fue necesario emplear el montaje de soldeo de la figura 2 de la norma, aplicable hasta 3kJ/mm. La energía de soldeo está limitada a un máximo de 3 kJ/mm.

Para la preparación de los consumibles de soldadura antes de las pruebas de soldeo se realizó un secado en horno del fundente o flux de acuerdo a las indicaciones de fabricante que en este caso fue de 300°C durante 4 horas.

El secado se efectuó en un recipiente abierto colocado en un horno de secado calibrado y regulado a la temperatura correcta. El espesor máximo del fundente fue de ser de 35 mm en la bandeja.

El fundente se mantuvo durante todo el tiempo especificado a la temperatura de secado en horno, donde no se colocaron otros fundentes durante este mismo periodo de tiempo. Para el enfriamiento del flux en un compartimento estanco se utilizó el mismo equipo que con los electrodos, es decir la estufa de cultivos estanca de ITMA. En la Figura 21 se incluye la imagen de la bandeja abierta con el flux en su interior y dentro del horno de ITMA.



Figura 21 Calentamiento de flux en la bandeja de la mufla calibrada a tal efecto.

Para el alineamiento y sujeción de las probetas se utilizó un montaje de cobre, refrigerado por agua, como se representa en la figura 2 de la norma. La mordaza aseguró que se aplicara una presión uniforme en todos los ensayos con el fin de garantizar un buen contacto térmico. La refrigeración por agua permitió una obtención rápida de las probetas.

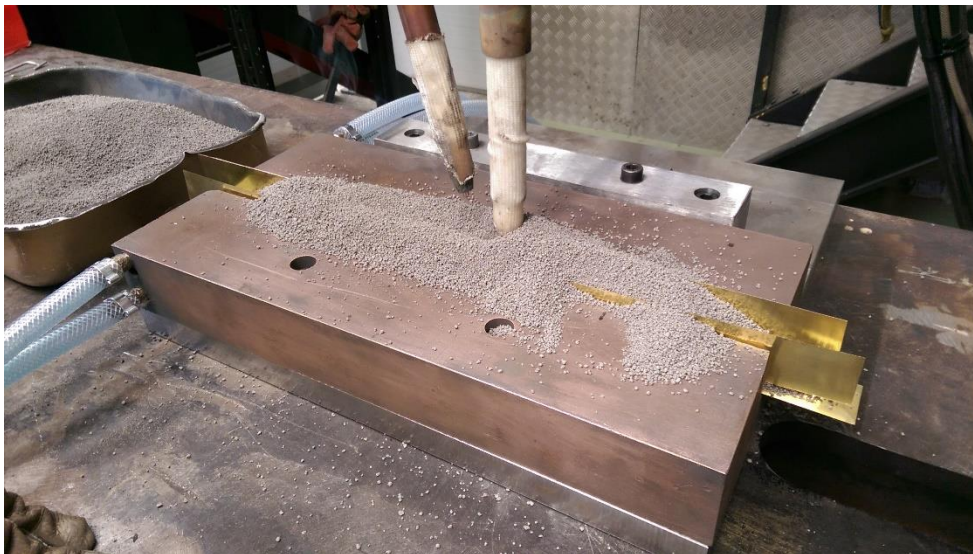


Figura 22 Realización de prueba de soldadura 2-1 con SAW.

La parte central de las probetas se alineó los apéndices de entrada y salida más largos (135 mm). El fundente se mantuvo durante la soldadura a una altura predeterminada constante de 30 mm por nivelación sobre el tope de los flejes insertados como se indica en la Figura 22

Se efectuaron tres soldaduras de ensayo, 2-1, 2-2 y 2-3, en diferentes probetas. El final de la cresta del cordón de soldadura se encontró en cada caso sobre el apéndice de salida a 25 mm de la parte central de la probeta. La longitud de la aportación en el apéndice de entrada también fue de 25 mm.

La corriente, la polaridad, la tensión, el tiempo de soldeo, la longitud de la soldadura, la velocidad de alimentación del hilo y la longitud del hilo libre, la temperatura y la humedad ambiente, se anotaron en cada una de las pruebas de ensayo.

Después de apagarse el arco y sin ningún retraso, se extrajeron las probetas del montaje, se enfriaron rápidamente de acuerdo a las indicaciones del hito 1.

A continuación se incluyen en las siguientes tablas, con formato de procedimiento de soldadura, las variables esenciales asociadas a las probetas 2-1 a 2-3.

DATOS DEL FABRICANTE / MANUFACTURER DATA

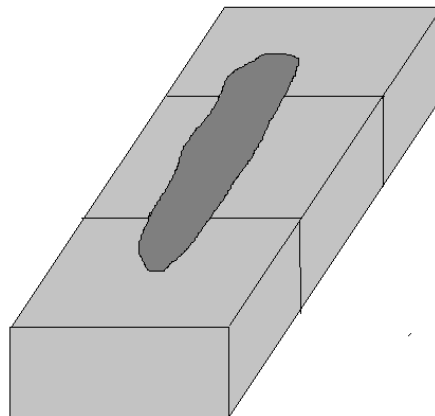
Empresa: <i>Company:</i>	ITMA	Lugar: <i>Location:</i>	Aviles (ASTURIAS)
Coordinador de soldadura: <i>Welding coordinator:</i>	Ricardo Alvarez	Nombre del soldador: <i>Welder name:</i>	Jose Manuel Fernandez
WPS Nº: <i>WPS Nº:</i>	SAW15	Fecha de soldeo: <i>Test date:</i>	17-11-2016

MATERIAL BASE / PARENT MATERIAL

De designación: <i>From designation (Heat):</i>	S355J2+N	A designación (colada): <i>To designation (Heat):</i>	---
De grupo (ISO/TR 15608): <i>From group (ISO/TR 15608):</i>	1.2	A grupo (ISO/TR 15608): <i>To group (ISO/TR 15608):</i>	---
Espesor: <i>Thickness:</i>	10	Espesor: <i>Thickness:</i>	---
Diámetro exterior: <i>Outside diameter:</i>	N.A.	Diámetro exterior: <i>Outside diameter:</i>	---

DISEÑO y/ DESIGN: SECUENCIA DE SOLDEO / WELDING SEQUENCE

De acuerdo a figura 2 de ISO 3690.



Registro de cualificación de procedimiento de soldeo (WPQR) según UNE-EN ISO 15614-1:2004 con la colaboración de FUNDACIÓN ITMA UNE-EN ISO 15614-1:2004 Welding Procedure Qualification Record (WPQR) with FUNDACIÓN ITMA collaboration

DETALLES DE LA UNIÓN / JOINT DETAILS

Tipo de unión: <i>Joint type:</i>	Cordón de recargue	Tipo de soldadura: <i>Welding type:</i>	Soldadura a recargue
Preparación y limpieza: <i>Preparation & cleaning:</i>	Corte por agua y mecanizado	Limpieza entre pasadas: <i>Interpass cleaning:</i>	---
Respaldo (material): <i>Backing (material):</i>	Si metal base	Gas de respaldo (caudal): <i>Backing gas (flow rate):</i>	No
Resanado (método): <i>Back gouging (method):</i>	No	Profundidad de resanado: <i>Back gouging deep:</i>	No

Pasadas (por lado): <i>Pass (per side):</i>	Simple	Posición de soldeo: <i>Welding position:</i>	PA
---	--------	--	----

MATERIALES DE APORTACIÓN / FILLER MATERIALS

Marca (nº lote): <i>Trade Mark (lot nº):</i>	OE-SD3+OP121TT	Designación: <i>Designation:</i>	AWS 5.17: F7A8 EH12K
Fabricante <i>Manufacturer:</i>	Oerlikon	Manipulación: <i>Handling:</i>	Ver indicaciones de fabricante/ see consumable data sheet
Flux	OERLIKON OP12TT	Par Varilla Flux	AWS 5.17: F7A8 EH12K

PARÁMETROS DE SOLDEO / WELDING PARAMETERS

Probeta Specimen	Proceso Process	Tamaño metal aportación Filler metal size (mm)	Corriente Current			Temperatura a °C	Humedad	Velocidad avance Travel speed (cm/min)	Aporte térmico Heat input (KJ/mm) ηproceso = 1	
			Amperios Amps	Voltios Volts	Tipo y polaridad Type & polarity					
PA	2-1 2-2 2-3	121	Ø4	650 650 650	30 30 30	CCEP/DCEP(+)	24	80%	45 45 45	2.6 2.6

PRECALENTAMIENTO (UNE EN ISO 13916) / PREHEATING (EN ISO 13916)

Temperatura precalentamiento: <i>Preheat temperature:</i>	24°C -	Temperatura entre pasadas: <i>Interpass temperature:</i>	---
Mantenimiento de temperatura: <i>Temperature holding:</i>	-	Sistema calentamiento: <i>Heat system:</i>	Llama oxiacetilénica

PARÁMETROS ESPECÍFICOS PARA CADA GRUPO DE PROCESOS/ SPECIFIC PARAMETERS FOR EACH GROUP OF PROCESSES

Todos los procesos / All process		Dist.boquilla a la unión (mm): <i>Dist.contact pipe to joint (mm):</i>	25
Proceso 12 (SAW) / Process 12 (SAW)			
Nº de electrodos: <i>Nº of electrodes:</i>	Heat Input minimum; 1 electrode (121)	Configuración y polaridad: <i>Setting and polarity:</i>	Primer/1st electrode: DCEP(+)

TÉCNICA DE SOLDEO / WELDING TECHNIQUE

Nº de cordón Bead Nº	Proceso de soldeo Welding process	Tipo de proceso Process type	Parámetros de oscilación (si procede) Oscillation parameters (if applicable)				
			Manual / Semiautomático Manual / Semiautomatic	Mecanizado / Automático Mechanized / Automatic			
			Tipo de pasada (ancho) Pass type (width)	Tipo de pasada Pass type	Frecuencia Frequency	Tiempo de parada entre pasadas Interbeads stop time	
PA	Todas All	121	Automático/automatic	Recta (18 mm.)	---	---	

FABRICANTE:
MANUFACTURER:

ORGANISMO EXAMINADOR:
EXAMINING BODY:



Avilés, a 11 de Noviembre de 2016

Ricardo Álvarez Fernández
EWE-ES 425



Registro de cualificación de procedimiento de soldeo (WPQR) según UNE-EN ISO 15614-1:2004 con la colaboración de FUNDACIÓN ITMA
UNE-EN ISO 15614-1:2004 Welding Procedure Qualification Record (WPQR) with FUNDACIÓN ITMA collaboration

Tabla 4 Parámetros de soldadura para 2-1, 2-2, 2-3 pruebas de soldadura con SAW.

T2.3 Procedimiento de soldadura para soldadura semiautomática de hilo tubular

En el caso de este proyecto la ejecución de las soldaduras de ensayo se realizó con aportaciones de calor superiores a los 2 kJ/mm, con lo cual se utilizó el montaje de cobre refrigerado por agua como indicado para el proceso anterior de SAW, tanto para la alineación y como para la sujeción de las probetas. En este caso los apéndices de entrada y salida de las probetas fueron de 85 mm de longitud.

Se efectuaron tres soldaduras de ensayo sobre diferentes probetas, 3-1, 3-2 y 3-3. La aportación se realizó a lo largo del eje central de la probeta. La corriente de soldeo, la polaridad, la tensión, el tiempo, la longitud de la soldadura, la longitud del hilo libre, la velocidad de avance, el caudal de gas y la temperatura y humedad ambientes en el puesto de soldeo se anotaron para cada una de las tres.

Como en los casos anteriores, después de extinguirse el arco y sin pérdida de tiempo, se retiraron las probetas del montaje y se enfriaron rápidamente, de acuerdo a lo indicado en el procedimiento de enfriado comentado en el hito anterior.

En este caso se contó con un manipulador robotizado para generar la trayectoria longitudinal del recargue generado.



Figura 23 Realización de prueba de soldadura 3-1 con FCAW



Figura 24 Enfriamiento durante la prueba de soldadura 3-1 con FCAW

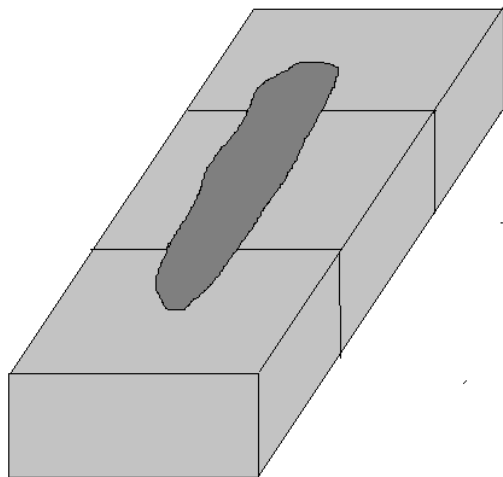
A continuación se incluyen en las siguientes tablas, con formato de procedimiento de soldadura, las variables esenciales asociadas a las probetas 3-1 a 3-3.

DATOS DEL FABRICANTE / MANUFACTURER DATA

Empresa: <i>Company:</i>	ITMA	Lugar: <i>Location:</i>	Avilés (ASTURIAS)
Coordinador de soldadura: <i>Welding coordinator:</i>	Ricardo Alvarez	Nombre del soldador: <i>Welder name:</i>	Jose Fernandez
WPS Nº: <i>WPS Nº:</i>	FCAW-17	Fecha de soldeo: <i>Test date:</i>	15/12/2016

MATERIAL BASE / PARENT MATERIAL

De designación (colada): <i>From designation (Heat):</i>	S355J2+N	A designación (colada): <i>To designation (Heat):</i>	---
De grupo (ISO/TR 15608): <i>From group (ISO/TR 15608):</i>	1.2	A grupo (ISO/TR 15608): <i>To group (ISO/TR 15608):</i>	---
Espesor: <i>Thickness:</i>	10	Espesor: <i>Thickness:</i>	---
Diámetro exterior: <i>Outside diameter:</i>	N.A.	Diámetro exterior: <i>Outside diameter:</i>	---

DISEÑO / DESIGN	SECUENCIA DE SOLDEO / WELDING SEQUENCE
De acuerdo a figura 2 de ISO 3690.	

DETALLES DE LA UNIÓN / JOINT DETAILS

Tipo de unión: <i>Joint type:</i>	Cordón de recargue	Tipo de soldadura: <i>Welding type:</i>	Soldadura a recargue
Preparación y limpieza: <i>Preparation & cleaning:</i>	Corte por agua y mecanizado	Limpieza entre pasadas: <i>Interpass cleaning:</i>	---

Respaldo (material): <i>Backing (material):</i>	Si metal base	Gas de respaldo (caudal): <i>Backing gas (flow rate):</i>	No
Resanado (método): <i>Back gouging (method):</i>	No	Profundidad de resanado: <i>Back gouging deep:</i>	No
Pasadas (por lado): <i>Pass (per side):</i>	Simple	Posición de soldeo: <i>Welding position:</i>	PA

MATERIALES DE APORTACIÓN / FILLER MATERIALS

Marca (nº lote): <i>Trade Mark (lot nº):</i>	OK E71T-1	Designación: <i>Designation:</i>	SFA/AWS A5.36, E71T1-C1A0-CS2- H4, EN ISO 17632-A, T 46 2 P M 1 H10
Fabricante: <i>Manufacturer:</i>	ESAB	Manipulación: <i>Handling:</i>	-

GAS DE PROTECCIÓN / SHIELDING GAS

Composición (marca): <i>Composition (trade mark):</i>	98% Ar + 15% O ₂ (PRAXAIR)	Designación: <i>Designation:</i>	M21
Caudal (l/min): <i>Flow rate (l/min):</i>	18	Diámetro de la boquilla (mm): <i>Gas cup size (mm):</i>	16

PARÁMETROS DE SOLDEO / WELDING PARAMETERS

Probetas Test	Proceso Process	Tamaño metal aportación <i>Filler metal size (mm)</i>	Corriente <i>Current</i>			Temperatura °C	Humedad	Velocidad avance <i>Travel speed (cm/min)</i>	Aporte térmico <i>Heat input (KJ/cm)</i>
			Amperios <i>Amps</i>	Voltios <i>Volts</i>	Tipo y polaridad <i>Type & polarity</i>				
3-1			285	30			20	5.4	
3-2			285	30		24	80%	6.2	
3-3	136	Ø1.2	285	30	CCEP		20	8.5	

*Registro de cualificación de rocedimiento de soldeo (WPQR) según UNE-EN ISO 15614-1:2004
con la colaboración de FUNDACIÓN ITMA*

*UNE-EN ISO 15614-1:2004 Welding Procedure Qualification Record (WPQR) with FUNDACIÓN ITMA
collaboration*

Temperatura precalentamiento: <i>Preheat temperature:</i>	24°C	Temperatura pasadas: <i>Interpass temperature:</i>	---
Mantenimiento de temperatura: <i>Temperature holding:</i>	-	Sistema calentamiento: <i>Heat system:</i>	Llama oxiacetilénica

POST PARÁMETROS ESPECÍFICOS PARA CADA GRUPO DE PROCESOS/ SPECIFIC PARAMETERS FOR EACH GROUP OF PROCESSES

Proceso 13 (MIG/MAG) / Process 13 (MIG/MAG)									
Nº de cordón: <i>Bead Nº:</i>	Todos								
Modo de transferencia: <i>Mode of metal transfer:</i>	Arco pulsado								

TÉCNICA DE SOLDEO / WELDING TECHNIQUE

Nº de cordón <i>Bead Nº</i>	Proce so de soldeo <i>Weldin g process</i>	Tipo de proceso <i>Process type</i>	Parámetros de oscilación (si procede) <i>Oscillation parameters (if applicable)</i>				
			Manual / Semiautomático <i>Manual / Semiautomatic</i>		Mecanizado / Automático <i>Mechanized / Automatic</i>		
			Tipo de pasada (ancho) <i>Pass type (width)</i>	Tipo de pasada <i>Pass type</i>	Frecuencia <i>Frequency</i>	Tiempo de parada entre pasadas <i>Interbeads stop time</i>	
Todos	136	Semiauto mático	Recta (6 - 8 mm.)				

FABRICANTE:
MANUFACTURER:

ORGANISMO EXAMINADOR:
EXAMINING BODY:

Avilés, a 15 de Diciembre de 2016

Ricardo Álvarez Fernández
EWE-ES 425

*Registro de cualificación de procedimiento de soldeo (WPQR) según UNE-EN ISO 15614-1:2004
con la colaboración de FUNDACIÓN ITMA
UNE-EN ISO 15614-1:2004 Welding Procedure Qualification Record (WPQR) with FUNDACIÓN ITMA
collaboration*



Tabla 5 Parámetros de soldadura para 3-1, 3-2, 3-3 pruebas de soldadura con SAW

H3: MEDICIÓN DEL HIDRÓGENO EN LA SOLDADURA DE ENSAYO.

T3.1: Fabricación y puesta en funcionamiento del equipo necesario para la medición del H

Se ha llevado a cabo el montaje del equipo de vidrio para la medición del hidrógeno en el acero ferrítico siguiendo las pautas definidas en la norma de referencia, UNE EN ISO 3690. En dicha norma viene especificado un posible diseño del equipo, que en principio es el que hemos utilizado para el inicio de las primeras pruebas.

De esta manera, se ha seleccionado un tubo capilar de diámetro interno 3,6 mm. El aparato de captación de gas se compone de un tubo con forma de Y (tubo-Y) al que se le acopla por uno de sus extremos una válvula de vacío de dos vías.

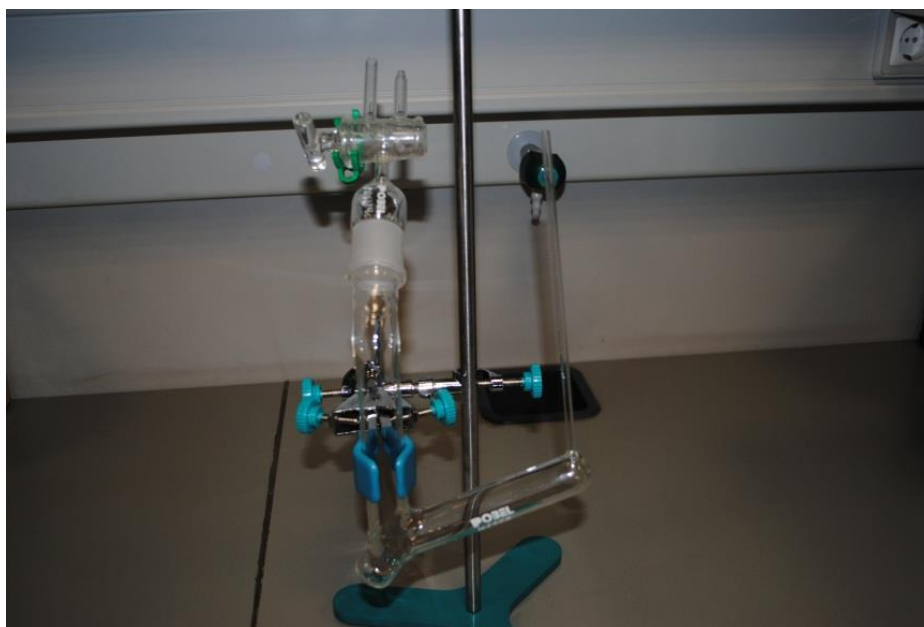


Figura 25 Sistema de análisis de hidrógeno difusible.



Figura 26 Sistema de análisis de hidrógeno difusible.

Una vez fabricado el equipo para realizar la medición del hidrógeno difusible se procedió a su llenado con mercurio. El volumen es de aproximadamente 110 ml pero el peso es de 1200 g. Esto hace que el soporte que en principio se había diseñado no sea muy seguro para soportar el equipo una vez relleno con el mercurio.

Se decidió entonces modificar este diseño y fabricar uno que nos permita dejar el equipo apoyado en vertical y sea fácil desplazarlo en el soporte y manejarlo para poder hacer el vacío e introducir y extraer las muestras a analizar.

En la Figura 27 se puede el nuevo sistema de soporte para el equipo de medición.

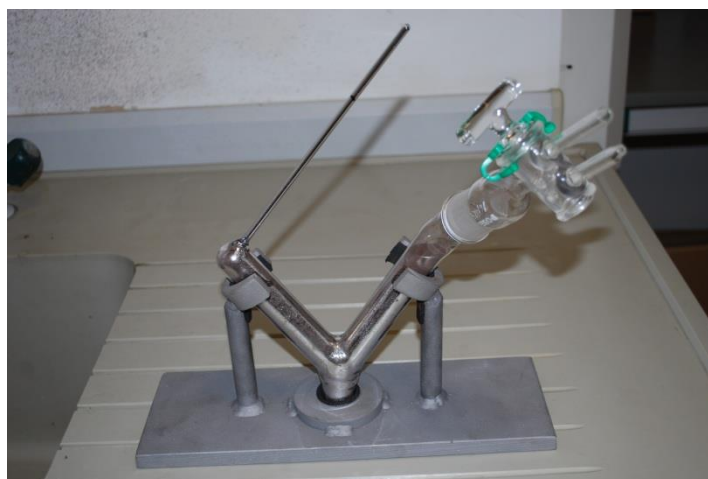


Figura 27 Soporte y sistema de análisis de hidrógeno difusible.

Para extraer el aire del sistema se coloca la válvula de dos vías y se coloca en posición de hacer vacío conectando una bomba de vacío. A continuación se gira la llave de la válvula y se deja entrar el aire.

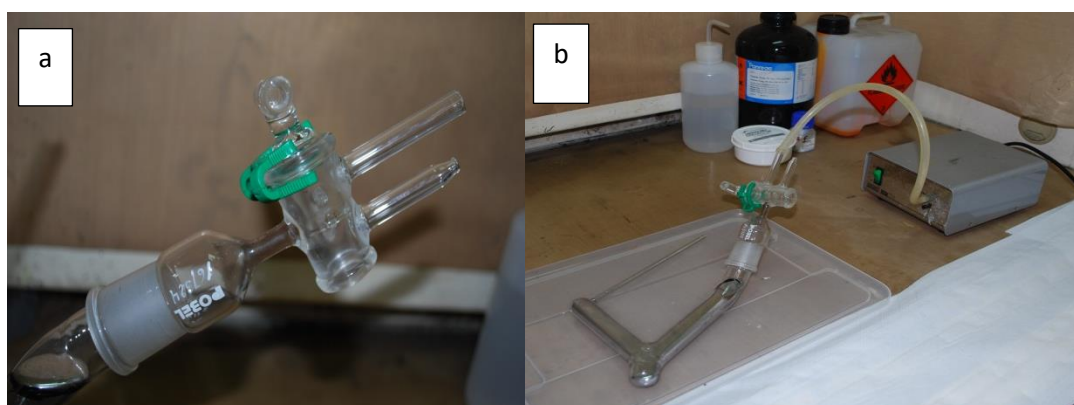


Figura 28 Válvula de dos vías para hacer vacío. Figura 29 b: Bomba de vacío conectada a la válvula

T.3.2 Puesta a punto del método de análisis.

La muestra a evaluar consiste en una probeta soldada con las dimensiones adecuadas para poder introducirla en el equipo de medida (Figura 29), de acuerdo con las indicaciones de la norma UNE En ISO 3690. Las muestras (con un cordón de soldadura en la parte superior) miden: largo x ancho x espesor: 30x15x10 mm en el caso de las soldaduras de SMAW y de FCAW y 15x30x10 mm en el caso de las piezas de SAW.

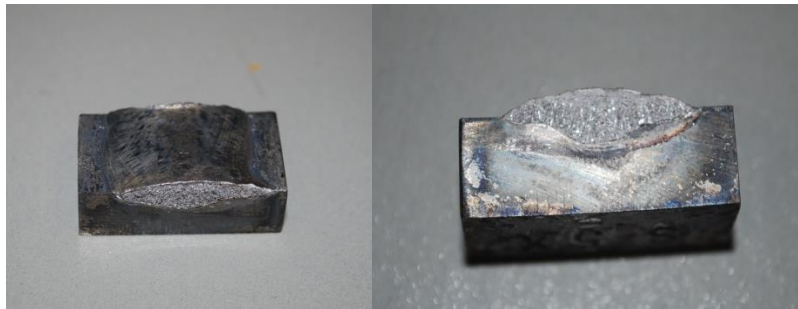


Figura 29 Probeta tipo a ensayar. Tipo figura 1 de UNE EN ISO 3690 para SMAW.

La muestra debe de permanecer refrigerada en nitrógeno líquido hasta el momento de proceder a realizar el ensayo para impedir la difusión del hidrógeno (Figura 30). Por ese motivo para la validación del método tuvieron que hacerse probetas específicas el mismo día de cada uno de los análisis, con objeto de minimizar el consumo de Nitrógeno.



Figura 30 Deward con la muestra almacenada

La muestra se saca del recipiente que contiene nitrógeno líquido y la introducimos en un vaso con agua para quietarle la escarcha generada por diferencia de temperatura (Figura 31).



Figura 31 Preparación de muestra para su introducción en el equipo de medida.

Se limpia con acetona se seca con aire y ya está preparada para ser introducida en el equipo de medida lo más rápido posible.

La muestra hay que introducirla a través del brazo abierto, quitando la válvula, con la ayuda de un imán de va arrastrando la muestra a través del mercurio hasta colocarla justo en el otro extremo, al final del otro brazo de la "V" justo donde empieza el capilar (Figura 32)



Figura 32 Introducción de la muestra en el equipo de medición

Hay que tener precaución de que no entre aire a través del capilar.

La muestra queda suspendida en el baño de mercurio, y se mantiene ahí el tiempo suficiente para que todo el hidrógeno contenido en la muestra difunda. En función del contenido de hidrógeno el tiempo puede variar.

El hidrogeno presente en la muestra difunde a través del mercurio del capilar y va desplazando la columna de mercurio hacia abajo en el capilar (Figura 33)

Nivel de Hg una vez difundido todo el hidrógeno



Figura 33 Difusión del hidrógeno a través del capilar de mercurio

Ante la imposibilidad de tener material de referencia (patrones) para este tipo de ensayo trataremos de ver cómo se comporta el dispositivo diseñado para poder hacer la medición de hidrógeno difusible utilizando probetas soldadas que sabemos que tienen en elevado contenido en hidrógeno. Durante el proceso de validación del método, se pudo comprobar que las muestras obtenidas mediante FCAW prácticamente no presentaban contenidos en hidrogeno. Esto es debido a que el consumible de soldadura de FCAW tiene su flux (elemento higroscópico) encapsulado en el interior de un hilo metálico hueco. La morfología de este electrodo consumible en formato de bobina, reduce la cantidad de humedad que el flux puede absorber de la atmosfera. Las pruebas realizadas sobre este consumible presentaron resultados menores de $1\text{mm}^3/100\text{g}$ de hidrogeno difusible en todos los casos. Sin embargo estas probetas pudieron usarse finalmente como referencia de piezas de alto contenido en hidrogeno al sobresaturarlas de hidrogeno en el reactor de ITMA.

Se preparan, por tanto, las probetas de FCAW (de bajo hidrogeno inducido) y se sometieron al proceso de saturación de hidrógeno mediante el equipo de ITMA que se usa para los ensayos de disbonding según la norma ASTM G 146. El proceso de “disbonding” consiste en someter una muestra a un entorno de hidrógeno a alta presión y temperatura elevada durante un período de tiempo específico. En concreto este ensayo se usa para simular las condiciones de servicio en un reactor de hydrocracking para la industria petrolífera. Las condiciones de alta presión de hidrogeno puro a alta temperatura favorecen el enriquecimiento en hidrogeno por parte de las probetas soldadas, en niveles superiores a la cantidad de hidrogeno inducida por las soldaduras anteriores (ya bien sean SMAW, SAW o FCAW).

Mantenemos las probetas soldadas durante 24 horas a alta presión de hidrogeno puro (195 bar y 450°C) para asegurar el enriquecimiento en hidrogeno hasta nivel de saturación. Una vez saturadas las muestras, se libera la presión de hidrogeno y se retiran las probetas del reactor. Las muestras así preparadas se introducen inmediatamente en un recipiente con nitrógeno líquido para evitar la difusión del hidrógeno antes de meter la probeta en el sistema de medición (Figura 5). El nitrógeno enfría rápidamente las probetas y se consigue de esta forma detener la difusión del hidrogeno hacia

la atmosfera, quedando retenido en el interior de la pieza una gran cantidad de gas hidrogeno ocluido fruto del proceso de enriquecimiento simulado comentado.

Hacemos un primer ensayo con una de las probetas saturadas de hidrógeno, la introducimos en el sistema que contiene el mercurio y vamos viendo la evolución del proceso. El hidrogeno difundido se desplaza a través de la columna capilar de mercurio y va desplazando al mercurio en el capilar (Figura 8). La probeta debe mantenerse dentro del sistema hasta la total difusión del hidrógeno. Se observa el sistema diariamente comprobando el desplazamiento de la columna de mercurio en el capilar hasta el momento en que no haya desplazamiento de la columna de mercurio.

El ensayo se ha mantenido durante 14 días hasta que la variación de la columna de mercurio fue despreciable. Se procede entonces a realizar las mediciones necesarias para hacer el cálculo del volumen de hidrógeno difundido. Se ha podido observar que la cantidad de hidrógeno medida en el equipo, se estabiliza en ese periodo, con lo cual podemos definir la extensión máxima del ensayo en 14 días, para poder obtener una medida de la cantidad de hidrogeno inducido de forma fiable.

Medimos la presión atmosférica en mm de Hg con un equipo de medición (beamex), y la temperatura con un termómetro (Figura 34).



Figura 34 Equipo de medición de presión atmosférica y termómetro

Una vez finalizada la difusión de hidrogeno de la muestra, se mide la altura de la columna de hidrogeno generada en el capilar (con un catetómetro o calibre) (Figura 35).



Figura 35 Medición del desplazamiento de la columna de mercurio.

Se tiene que medir la diferencia de nivel de mercurio entre los brazos del tubo en “Y”, para ello medimos la altura desde la base a los dos niveles y se calcula la diferencia (Figura 36)



Figura 36 Medición de alturas para calcular la diferencia de nivel entre los tubos en “Y”

Cuando se recogen todas estas medidas se retira la probeta del dispositivo y se pesa (m_2) en gramos. Se registran todos los datos correspondientes.

Tratamiento de los resultados.

El volumen de hidrógeno recogido, corregido a las condiciones normales de temperatura y presión (TPN), viene dado por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{273(P-H)(\pi r^2 * C)}{760(273+T)1000}$$

donde:

V es el volumen del hidrógeno recogido, en milímetros en las TPN

P es la presión atmosférica, en mm de mercurio

H es la diferencia del nivel de mercurio entre los brazos del tubo en Y, en mm

C es la altura de la columna de gas por encima del mercurio, mm

r es el radio del tubo capilar, en mm (1.7 mm)

T es la temperatura ambiente en el momento de la medición del hidrógeno °C

Cálculo y expresión de los resultados

Hidrógeno difusible en el metal depositado H_D . Se calcula el volumen H_D en las TPN del hidrogeno difusible por 100 g de metal depositado:

$$H_D = (V * 100) / (m_2 - m_1)$$

donde:

V volumen de hidrógeno recogido

m_1 peso de la probeta antes de ser soldada

m_2 peso de la probeta a la finalización del ensayo

Ficha de los datos de análisis:

Todos los datos requeridos para el cálculo del hidrógeno difusible se deben registrar en la hoja de cálculo diseñada a tal fin.

Peso de muestra antes de soldar	M1			
Peso de muestra al acabar ensayo	M2			
Presión atm (mm Hg)	P			
T ambiente °C	T			
r radio del capilar	r	1.7		
Altura columna de gas por encima de Hg (mm)	C		Brazo cap	Brazo abierto
Diferencia de nivel entre los dos brazos (mm)	H	0		

Volumen
0.000
Hidrogeno difusible en el metal depositado
H_D
#¡DIV/0!

V Volumen de hidrógeno recogido

Los resultados obtenidos las primeras muestras sobresaturadas de hidrogeno, realizadas con la finalidad de optimizar el procedimiento de medida ya desarrollado y documentado, se pueden ver a continuación:

Peso de muestra antes de soldar	M1	34.2		
Peso de muestra al acabar ensayo	M2	38.48		
Presión atm (mm Hg)	P	757		
T ambiente °C	T	21		
r radio del capilar	r	1.7		
Altura columna de gas por encima de Hg (mm)	C	78.16	Brazo cap	Brazo abierto
Diferencia de nivel entre los dos brazos (mm)	H	7.78	142.93	135.15

Volumen 0.650
Hidrogeno difusible en el metal depositado H_D 15.18 mm ³ /100g

V Volumen de hidrógeno recogido

Este volumen es aproximadamente 2 veces el volumen inducido por parte de un consumible de soldadura que no este certificado para soldaduras de responsabilidad (designación H8= 8 mm³/100g).

Una vez puesto en marcha el método de análisis, se calculó su precisión y reproducibilidad (T.3.3). En un principio, tal y como se refleja en la solicitud, se pretendía calcular la precisión y reproducibilidad del método utilizando 10 probetas soldadas en las mismas condiciones. Una vez puesto en método a punto vemos que el tiempo requerido para cada probeta dependiendo del contenido de H en la muestra puede extenderse hasta 14 días. Esto hace que sea prácticamente imposible mantener las probetas almacenadas durante todo el tiempo necesario en nitrógeno líquido y asegurar que el H no difunda de la muestra antes de hacer el ensayo.

Decidimos entonces hacerlo en bloques de tres probetas soldadas en las mismas condiciones para asegurar que hacemos un cálculo de precisión adecuado donde se tiene en cuenta las variaciones que pueden ser debidas al método en sí y no a la preparación de las probetas.

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior no hay material de referencia en el que tengamos un valor de hidrógeno difusible certificado. Es difícil introducir un volumen conocido de gas de hidrógeno asegurando que es hidrogeno puro y no inyectamos aire en el equipo.

- Validación del método de ensayo. Alcance del método

Para poder hacer una comprobación de capacidad de medición que podemos tener con este método compararemos los resultados de hidrógeno difundido en muestras que las hemos sometido a un proceso de saturación de H y muestras que han sido soldadas con consumibles en condiciones óptimas que nos garanticen que el contenido de hidrogeno difusible va a ser bajo.

Estas medidas nos va a dar una estimación del rango de trabajo del equipo, viendo las variaciones de altura en el tubo capilar en el rango alto y bajo de trabajo para ver de esa forma la resolución que podemos tener en el método.

La medida de la altura del capilar se hace como se puede ver en la figura 10 con un calibre.

Por esa forma de tomar la medida consideramos que el error para medidas de desplazamientos menores de 3 mm es importante e implica como es lógico un error en el contenido de H importante.

Desplazamientos de 1 mm en el capilar del equipo utilizado supone $0,008 \text{ mm}^3$ que teniendo en cuenta el peso del material depositado (aproximadamente 4 g) supone 0.22 mm^3 de H por 100 g de material depositado.

Podemos entonces establecer como límite de detección del método $0.22 \text{ mm}^3/100\text{g}$.

El error que podemos cometer en el contenido de H por mm de desplazamiento es entonces de 0.008 mm^3 . Establecemos el límite de cuantificación en 3 mm de desplazamiento en la columna que supone un volumen de H de $0,024 \text{ mm}^3$ ($0.66 \text{ mm}^3/100\text{g}$)

El punto alto del alcance de nuestro método nos lo dará la longitud del capilar del equipo utilizado. La longitud de nuestro capilar es de 180 mm esto supone un volumen máximo de hidrogeno de 1.51 mm^3 ($39.68 \text{ mm}^3/100\text{g}$).

Alcance del método desarrollado:

Volumen de Hidrógeno: $0.024 - 1.512 \text{ mm}^3$

Hidrógeno difusible en el metal depositado: $0.66 - 39.68 \text{ mm}^3/100\text{g}$

Para comprobar que el punto alto del alcance de nuestro método es adecuado y puede ser suficiente para controlar el hidrógeno difusible utilizaremos muestras saturadas de hidrógeno.

Como ya se comentó en el apartado anterior en Fundación ITMA disponemos del proceso de saturación de hidrógeno “disbonding”. Se preparan dos probetas soldadas y se introducen en el reactor para proceder a la inducción de hidrógeno. Se mantienen 24 horas en el reactor para poder asegurar la saturación de hidrógeno en las probetas.

Una vez transcurridas las 24 horas sacamos las probetas del reactor y se introducen en un recipiente con nitrógeno líquido donde tienen que permanecer hasta realizar el ensayo de medida del hidrógeno difusible.

Se coge una de las probetas (codificada H3) y se introduce en el equipo de medida, se va viendo diariamente la variación de la columna de Hg en el capilar del equipo hasta que ya no hay variación en el volumen desplazado. La muestra se mantiene en el equipo durante 14 días.

Una vez finalizada la difusión de H se extrae la muestra del dispositivo y se introduce la siguiente probeta (codificada S3) se mantiene también durante 14 días.

La longitud de desplazamiento máxima obtenida es de 131 mm por lo que el límite superior del alcance no va a ser superado ya que las probetas ensayadas están saturadas de hidrógeno.

Los resultados obtenidos en estas dos probetas se muestran en la Tabla 6

Código	H (mm ³ /100g)
H3	19.4
S3	28.5
Promedio	24.0
Desviación	6.4

Tabla 6 resultados de H para muestras saturadas de H

A la vista de los resultados la desviación entre los dos valores obtenidos es elevada. Esto puede deberse a la preparación de la probeta y al posterior almacenamiento y manejo para evitar la difusión del H antes de introducir la probeta en el sistema. En concreto estas probetas se prepararon usando el proceso FCAW descrito (parámetros incluidos) en el procedimiento de soldadura adjuntado en el entregable de la primera anualidad.

- Validación del método de ensayo. Precisión y reproducibilidad.

Una vez establecido en alcance de trabajo y comprobado que el método puede ser adecuado para valores máximos de hidrógeno (saturación de las muestras) pasamos a comprobar la respuesta del método para probetas preparadas con consumibles en condiciones óptimas.

Se preparan tres probetas, con electrodos tipo SUPERCITO 7018S, Designation: EN ISO 2560-A: E 42 5 B 32 H5 AWS A5.1: E7018-1, proceso tipo SMAW. Estos consumibles de soldadura permanecieron en mufla de calentamiento según las recomendaciones del fabricante desde su extracción del paquete precintado.

Probeta Specimen	Proceso Process	Tamaño metal aportación Filler metal size (mm)	Corriente Current			Temperatura °C	Humedad	Velocidad avance Travel speed (cm/min)	Aporte térmico Heat input (KJ/mm)	
			Amperios Amps	Voltios Volts	Tipo y polaridad Type & polarity				$\eta_{\text{proceso}} = 0,8$	
PA	1-1	111	Ø4	285	27	24	80%	25	1,5	
	1-2		Ø4	285	27			CCEP	25	1,5
	1-3		Ø4	285	27			25	1,5	
			Ø4	285	27			25	1,5	

Tabla 7 Tabla de parámetros de proceso

Tras la evaluación del hidrogeno difusible mediante el equipo de ITMA, en este caso, se pudo comprobar que el contenido en hidrógeno es menor que el de las muestras sobresaturadas, y al cabo de tres días no se observó variación en la columna de mercurio desplazada. Se mantienen durante 3 días cada una (manteniendo las probetas pendientes de ensayo en un recipiente con nitrógeno líquido). Los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla II. Estos resultados son compatibles con el nivel especificado por el fabricante para estos electrodos, tipo E7018-1, nivel H6 que significa contenido máximo inducido por proceso de soldadura de 6 mm³/100g de soldadura, en condiciones de almacenamiento de electrodos de acuerdo con recomendaciones del fabricante y ejecución según adecuadas técnicas de soldadura. Podemos por tanto concluir tras el análisis de las estas muestras, que los resultados obtenidos coinciden con la especificación del material aplicado.

Código	H (mm ³ /100g)
E5X	5.4
E6X	6.1
E4X	6.4
Promedio	6.0
Desviación	0.5

Tabla 8 Resultados de H

Los resultados obtenidos en cuanto a precisión son mucho mejores que en el caso de las muestras saturadas de H. Esto puede confirmar que el problema en el caso de las muestras saturadas puede estar en el tiempo de análisis necesario que hace complicado mantener almacenadas en nitrógeno líquido varias probetas soldadas en las mismas condiciones.

Para estos valores de hidrogeno difusible la columna de mercurio desplazado es lo suficientemente amplia para garantizar una buena medida con el calibre.

Para ir viendo la variabilidad que podemos tener, se preparan otras tres probetas soldadas y al igual que en el caso anterior se mantiene durante 3 días en el dispositivo de medición de hidrogeno. En este caso las muestras E7x, E9x y XS4 se soldaron con el proceso SAW, de acuerdo al procedimiento de soldadura establecido en el WPS recogido en el entregable de la anterior anualidad.

El consumible usado fue un OE-SD3+OP121TT Designación: AWS 5.17: F7A8 EH12K de la marca Orlikon. Se le aplicó el proceso de secado a su flux según las recomendaciones del fabricante: 200°C-3 horas. En la Tabla 9, se incluyen los parámetros de proceso:

PARÁMETROS DE SOLDEO / WELDING PARAMETERS

Probeta Specimen	Proceso Process	Tamaño metal aportación Filler metal size (mm)	Corriente Current			Temperatura a °C	Humedad	Velocidad avance Travel speed (cm/min)	Aporte térmico Heat input (KJ/mm) ηproceso = 1	
			Amperios Amps	Voltios Volts	Tipo y polaridad Type & polarity					
PA	2-1 2-2 2-3	121	Ø4	650 650 650	30 30 30	CCEP/DCEP(+)	24	80%	45 45 45	2.6 2.6

Tabla 9 Parámetros de soldado / Welding parameters

En este caso los valores de hidrógeno obtenidos son inferiores comparados con la serie anterior. Dado que el proceso de arco sumergido se caracteriza por un mayor input térmico (mayor calor de la soldadura). El proceso al ser más energético permite que el sistema soldado alcance temperaturas superiores a las obtenidas en FCAW o SMAW. A medida que podemos asegurar un tiempo mayor a alta temperatura durante la fusión y enfriamiento del baño de soldadura, esto permite que el hidrógeno difundido en el interior de la misma pueda difundirse a la atmósfera más fácilmente por efecto del incremento del campo de temperaturas. En este caso la soldadura con F7A8 EH12K tiene especificado un valor de H5 máximo, que es compatible con los resultados obtenidos.

Código	H (mm ³ /100g)
E7X	3.0
E9X	4.2
XS4	3.6
Promedio	3.6
Desviación	0.6

Tabla 10

La precisión del método con las mediciones realizadas está en torno al 10-15 % dependiendo del nivel de hidrógeno presente en la muestra.

4. RESULTADOS OBTENIDOS.

- Se ha conseguido diseñar y fabricar moldes de control de temperatura, tanto para el caso de pruebas de medio, como de alto input térmico. En el caso del molde de cobre para alto input térmico (3kJ/mm), se ha fabricado siguiendo las indicaciones de la norma, incluyendo canales internos para la refrigeración con agua formada.
- Adicionalmente se ha conseguido establecer unas instrucciones técnicas para la manipulación y mecanizado de probetas, soldadura de probetas mediante SAW, soldadura de probetas mediante FCAW y soldeo de probetas mediante SMAW. Estos procedimientos cubren los tipos de consumibles más habituales con problemas de inducción de hidrógeno.
- Se ha establecido una sistemática de trabajo coherente con las indicaciones de la norma en términos de refrigeración forzada de las piezas una vez soldadas, tratamiento de las mismas y almacenaje a baja temperatura.
- Se ha diseñado y fabricado un equipo de medición de H₂ difusible.
- El método de medida del hidrógeno difusible en soldaduras se ha optimizado y desarrollado obteniendo unos valores de precisión en torno el 10 % en función del nivel de contenido de hidrógeno en las muestras.
- La exactitud del método no ha sido posible calcularla debido a que no existen materiales de referencia con un valor de hidrógeno difusible certificado frente al cual comparar el valor obtenido en nuestro sistema. Sin embargo se ha podido observar que el equipo puede valorar contenidos en hidrógeno en el entorno de las especificaciones de los consumibles usados.
- Se ha comprobado también que el proceso FCAW, en condiciones normales no presenta valores de hidrógeno inducido relevantes, menores en cualquier caso del $1\text{ mm}^3/100\text{g}$. Se utilizaron las probetas de FCAW con estos bajos valores para sobresaturar muestras con hidrógeno, a través del reactor de hidrógeno a alta presión y temperatura de ITMA (reactor de disbonding). Con estas muestras sobre saturadas se pudo comprobar que el equipo es capaz de realizar mediciones de hidrógeno 2 veces superiores a los valores más altos de hidrógeno especificados en los consumibles de soldadura normalizados.
- Los valores de medidas en piezas sobresaturadas requieren largos periodos de análisis de 14 días al menos, para poder evaluar la cantidad completa de gas ocluido en la red metálica de las piezas tratadas. Esta conclusión limita el tiempo de respuesta en la obtención de un resultado en determinados ensayos donde se presenten altos niveles de hidrógeno.