

ENSAMBLAJE DE LA CÁMARA DE VACÍO ITER: AVANCES EN LA FASE DE DESARROLLO

El proyecto internacional ITER tiene el objetivo de demostrar la viabilidad científica y técnica de la fusión nuclear por medio de la fabricación de un reactor de fusión en Cadarache.

Uno de los contratos en los que está trabajando ENSA consiste en el "Ensamblaje de la cámara de vacío". Para ello, ha sido preciso desarrollar diferentes procesos, técnicas y equipos que sean capaces de llevar a cabo los trabajos de ensamblaje cumpliendo con altos requisitos técnicos, de precisión y de calidad.

Todo este desarrollo se está validando sobre maquetas de escala real para confirmar su adecuación para el trabajo en Cadarache.

INTRODUCCIÓN

ITER es un proyecto internacional cuyo objetivo principal es demostrar la viabilidad científica y técnica de la fusión nuclear para la generación de energía a través de la construcción de una planta experimental en Cadarache, Francia. Cuenta con la cooperación internacional de la Unión Europea, Japón, China, India, Corea del Sur, Rusia y Estados Unidos (Figura 1).

El principal elemento es la máquina ITER, diseñada para producir 500 MWh de energía de fusión por períodos prolongados de tiempo a partir de una energía primaria de tan solo 50 MWh; esto representa que se producirá 10 veces más energía que la necesaria para mantener el plasma a la temperatura requeri-

da, unos 150×10^6 °C. La máquina ITER o reactor de fusión está compuesto por diferentes subsistemas entre los que se encuentran: la cámara de vacío y los puertos. Esta cámara está formada por una estructura de acero inoxidable de doble pared, con forma toroidal y espesores medios de 60 mm, compuesta por 9 sectores y 53 estructuras de puertos que se ensamblarán *in situ* (Figura 2).

OBJETIVO Y ALCANCE

Introducción al alcance

El alcance de ENSA en el proyecto ITER consiste en realizar las soldaduras y los ensayos no destructivos necesarios para la unión de los 9 sectores y los 53 puertos que conforman la cámara de vacío. El proyecto se encuentra dividido en las tres fases de la Figura 3.

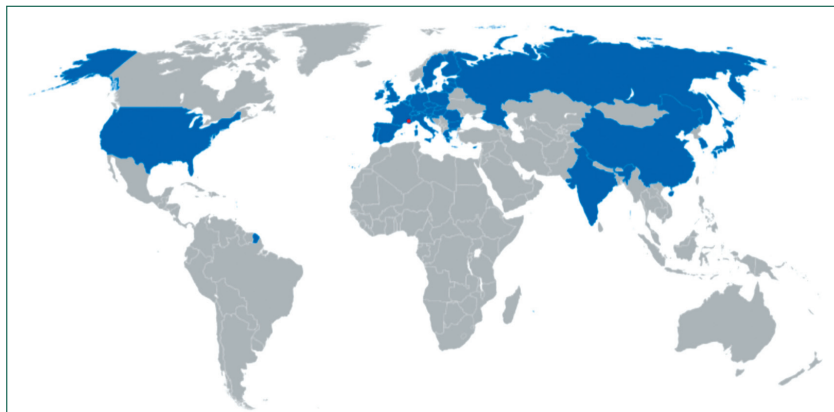


Figura 1. Participantes en el proyecto ITER.



ÓSCAR ARENAL

EQUIPOS NUCLEARES, S.A., S.M.E.
(ENSA)



LUIS BLANCO

EQUIPOS NUCLEARES, S.A., S.M.E.
(ENSA)

VACUUM VESSEL ASSEMBLY WELDING: DEVELOPMENT PHASE PROGRESS

ITER is an international project with the objective of demonstrating the scientific and technical feasibility of nuclear fusion through the building of a fusion reactor in Cadarache.

One of the contracts under the scope of ENSA is the "Vacuum Vessel Assembly Welding". For this project, it has been necessary to develop different processes, techniques and systems that are able to carry out the assembly activities fulfilling strict technical, accuracy and quality requirements.

All this development is being qualified through trials performed in real scale mock-ups to assess its adequacy for the work to be done in Cadarache.

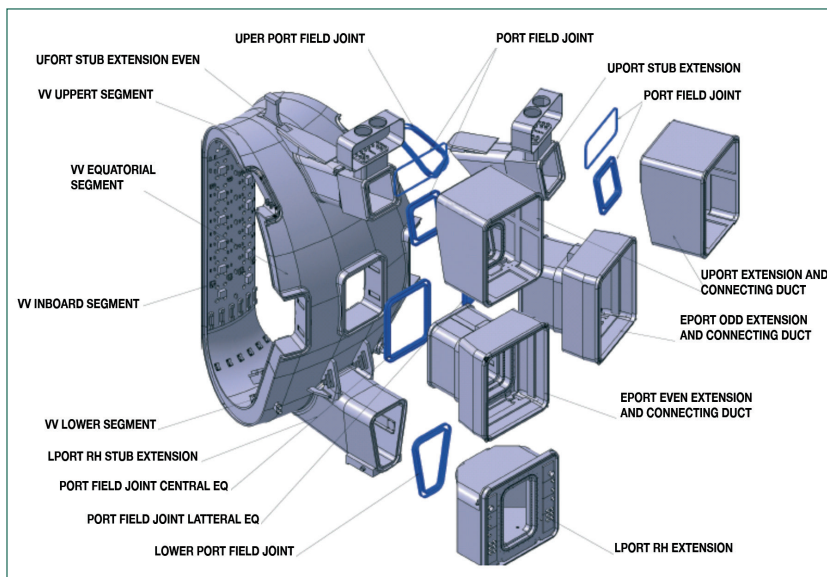


Figura 2. Sector y ensamble de puertos.

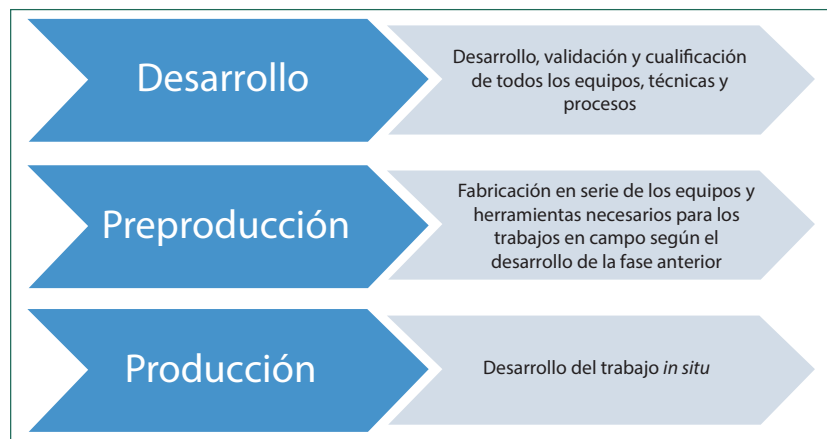


Figura 3.

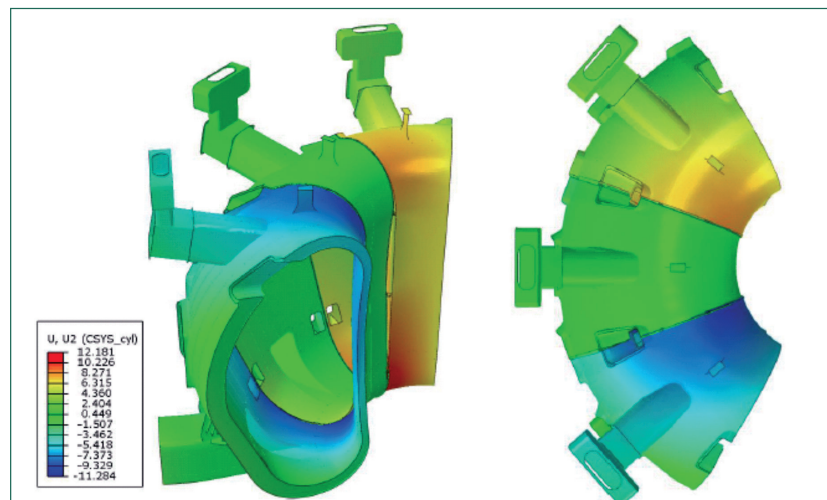


Figura 4. Simulación de desplazamientos tangenciales.

En la actualidad, ENSA se encuentra completando la primera fase del proyecto, denominada *Desarrollo*, habiéndose alcanzado un progreso del 95%.

Esta fase termina con la validación final de todos los equipos que se están desarrollando y con la cualificación de procesos y personal, utilizando maquetas representati-

EL DATO

En la actualidad el proyecto ITER se encuentra situado en el "top 3" de los proyectos científicos a lo largo de la historia, respecto a su nivel de inversión:

- Programa Apolo**
 - Coste: 135 000 millones de \$
 - Tiempo: 1961-1970
- Estación Espacial Internacional**
 - Coste: 100 000 millones de \$
 - Tiempo: 1980
- Proyecto ITER**
 - Coste: 30 000 millones de €
 - Tiempo: 1986 - Actualidad
- Proyecto Manhattan**
 - Coste: 25 000 millones de \$
 - Tiempo: 1939 - 1945
- Global Positioning System (GPS)**
 - Coste: 14 000 millones de \$
 - Tiempo: 1973-2000 (Fase I)

vas, tanto en dimensiones, escala 1:1, como en calidad de materiales.

Principales retos del proyecto

Las principales dificultades a las que se ha enfrentado ENSA y que se han tenido en cuenta para el desarrollo de todos los equipos, son:

- Más de 3 km de soldaduras complejas: se ha desarrollado un sistema de soldadura automático y es necesario cualificar operadores, equipamientos y procedimientos.
- Necesidad de controlar distorsiones y contracciones de soldadura: se ha definido una secuencia de soldadura específicamente diseñada para minimizar el efecto de las inevitables contracciones en los materiales. Además, las simulaciones previas y los controles dimensionales adquieren una especial importancia (Figura 4).
- Acceso desde un único sitio, el interior de la vasija de vacío, cuya estructura es de pared doble: ha sido necesario desarrollar sistemas para alcanzar la parte posterior de las soldaduras.
- Limitación de espacio en la parte posterior de las soldaduras (26 mm): ha sido necesario adaptar los sistemas de gas de respaldo y ensayos no destructivos a esta limitación (Figura 5).
- Espacio muy restrictivo en puertos y geometría de gran complejidad en la unión de éstos con los sectores.
- Necesidad máxima de alcance de herramientas de hasta 1500 mm, siendo introducidas por una abertura con dimensión máxima de 160 mm.

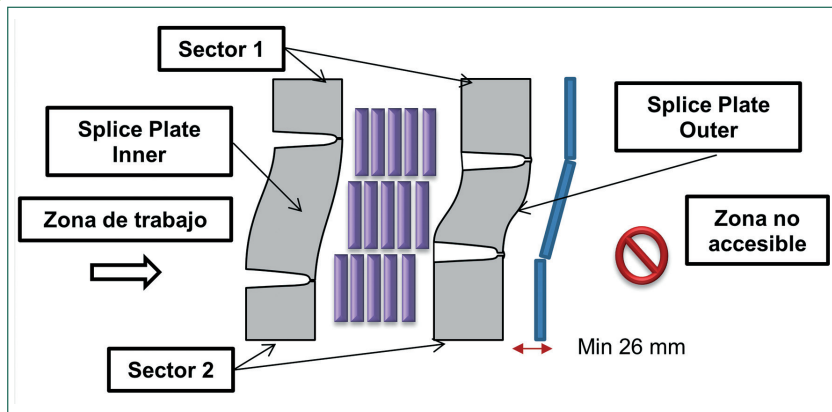


Figura 5. Condiciones de unión de sectores.

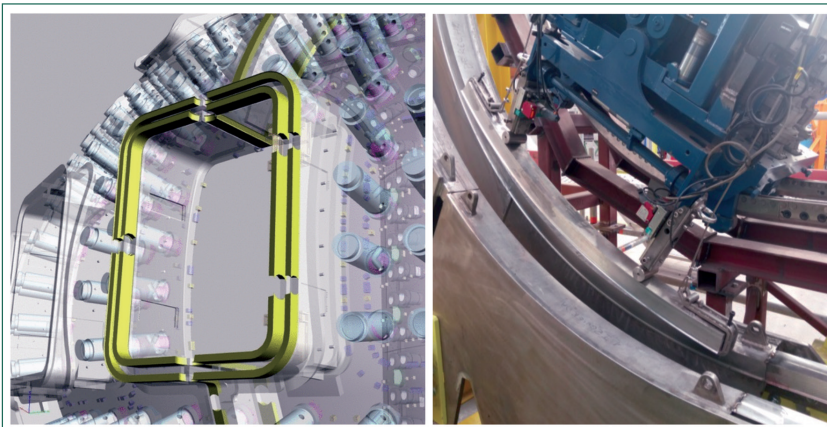


Figura 6. Diseño de splice plates.

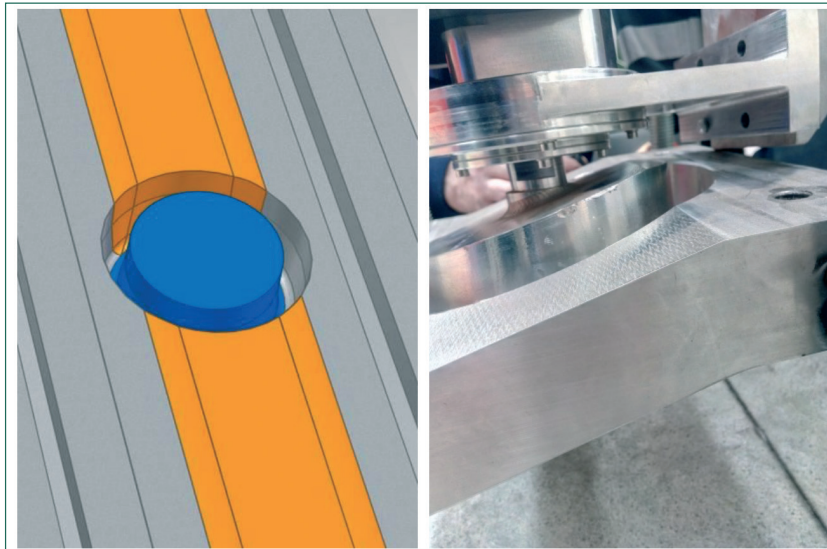


Figura 7. Diseño de biscuit.

- Mecanizado y posicionamiento de gran precisión debido a las tolerancias de fabricación y los requisitos de alineamiento (0,25 mm).
- Restricción total en cuanto al uso aceites de corte (taladrinas) para los trabajos de mecanizado en reparaciones, capping o mecaniza-

do de biscuits, debiendo ser todos ellos en seco.

Geometría de la junta

Los sectores se conectan a través de unas juntas de unión que denominamos *splice plates*, con unas dimensiones de 1500 a 3500 mm de largo, 100 mm de ancho y 60 mm de espesor.

Estas piezas tienen la función adicional de servir para absorber las diferencias dimensionales entre los sectores, de forma que se facilite su alineamiento y unión (Figura 6).

Cada junta del sector, con un desarrollo aproximado de 24 metros se divide en 15 *splice plates*. Para evitar el cruce de soldaduras entre estas juntas, facilitar el acceso para las inspecciones de raíz y unir las *splice plates* entre sí, se mecanizarán y soldarán unas piezas intermedias, de forma cilíndrica, denominadas *biscuits*.

Todas estas piezas intermedias se fabrican a medida mediante un proceso de escaneado 3D e ingeniería inversa de las superficies adyacentes a unir (Figura 7).

AVANCE DE LOS TRABAJOS OFICIALES

Introducción

Actualmente, en las instalaciones de ENSA, situadas en Maliaño, Cantabria, disponemos de 3 maquetas a escala real para realizar la validación final de cada uno de los equipos que estamos desarrollando. Las citadas maquetas son:

- Unión entre dos sectores.
- Puerto superior
- Puerto ecuatorial irregular número 4.

La maqueta de la unión entre sectores se trata de la principal en la fase de desarrollo, la que dará cabida a un mayor número de pruebas y a la validación de gran parte de los equipos.

En la Figura 8 se puede observar el posicionador de splice plates sobre los raíles y los tres robots de soldadura ya preparados cada uno de ellos sobre sus plataformas, listos para la soldadura del primer lote de splice plates.

El trabajo de campo requiere el ensamblaje de 17 puertos ecuatoriales, 14 de ellos idénticos y 3 irregulares. La maqueta de la Figura 9 representa uno de los irregulares. Sobre ella se probarán todos los equipos destinados al ensamblaje de los puertos, habiendo sido tomada esta decisión basándonos en la mayor complejidad de este puerto y en su representatividad con el resto.

El resto de sistemas que no puedan ser probados en el puerto ecuatorial serán validados en la maqueta del puerto superior (Figura 10). Actividades como el posicionado con utillaje manual, la soldadura de bisel asimétrico y la soldadura en pared simple serán realizadas en esta maqueta.

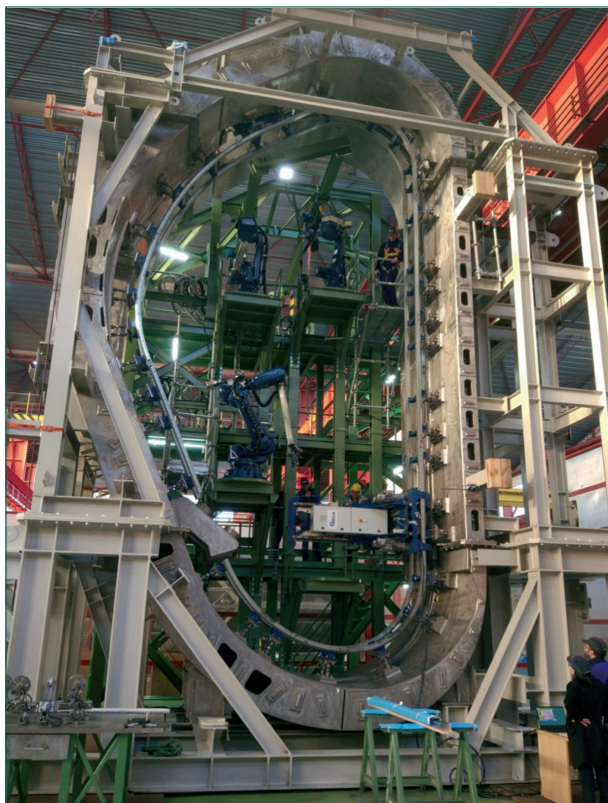


Figura 8. Maqueta 1:1 de unión de sectores.

Secuencia de trabajos

Entre las dificultades del proyecto se introdujo el control de las deformaciones y distorsiones de los elementos a ensamblar y las necesidades de adaptar la secuencia de soldadura para minimizar o compensar las contracciones que se producen por el efecto de las uniones soldadas.

Por ello, las distintas *splice plates* de los sectores o puertos se han agrupado en una serie de lotes que serán fabricados y ensamblados de manera secuencial.

Hasta que un lote de *splice plates* no esté soldado no se procederá a realizar el escaneo, ingeniería inversa y fabricación del siguiente. De esta forma garantizamos que la nueva fabricación absorba los cambios en tamaño de la junta y alineación debidos al proceso de soldadura previo.

Las actividades que quedan recogidas en el ensamblaje de los componentes a realizar son:

Fabricación de *splice plates*

Cada lote de *splice plates* que se fabrica requiere de un escaneo 3D previo, realizado con tecnología que nos garantiza precisiones de hasta 0.03 mm/m (Figura 11).

posicionado de piezas, soldabilidad y menor tiempo de máquina en fabricación.

Mediante este proceso se han diseñado y fabricado tres lotes de *splice plates* de la maqueta del sector y todas las de las maquetas de puertos.

Posicionamiento de *splice plates*

El sistema diseñado para el montaje y posicionamiento de las *splice plates* está fabricado y ha sido testado en la maqueta escala 1:1 del sector, con resultados satisfactorios (Figura 12).

Se trata de un sistema de movimiento por raíles, los cuales han sido montados paralelamente a la junta a soldar y siguiendo el contorno del sector, con una mesa de transferencia que se encarga de posicionar la *splice plate* y que está dotada de los grados de libertad necesarios para lograr el ajuste exigido con precisión de décimas de milímetro.

Soldadura de *splice plates*

Hablar de los trabajos de soldadura en este proyecto implica hablar de los dos principales equipos que se han desarrollado: soldadura robotizada y equipos de gas de respaldo.



Figura 9. Maqueta 1:1 de puerto ecuatorial HNB-DNB.

Posteriormente, la sala de diseño de ENSA realiza la ingeniería inversa de las piezas, obteniendo un diseño optimizado tras numerosas pruebas habiendo conseguido que sea compatible con los requisitos de



Figura 10. Maqueta 1:1 de puerto superior

El equipo de soldadura está formado por un cabezal de soldadura diseñado *ad hoc*, un robot comercial que reproduce la trayectoria necesaria para el soldeo de cada una de las *splice plates* y el desarrollo de un software específico para esta aplicación el cual permite controlar toda la operación desde una consola (*Human Machine Interface - HMI*).

El procedimiento de soldadura se ha venido desarrollando y cualificando durante los últimos 4 años, encontrándonos actualmente en la recta final, estando ya casi todos los procedimientos de soldadura aprobados por ITER y el organismo de control (Figura 13).

Para el desarrollo de los sistemas de protección de gas para la soldadura de raíz se ha contado con la colaboración del centro tecnológico Aimen. Durante el proceso de soldadura se ha procedido a diferenciar al menos tres situaciones: equipo automático, equipo manual y sistema particular para protección de *biscuits*.

- Equipo automático: se trata de un sistema formado por un carrito



Figura 11. Proceso de escaneado 3d.



Figura 12. Sistema de posicionado de SP en sectores.

articulado que se desplaza por la parte posterior de la junta, de forma autónoma y sincronizada con el brazo robótico de soldadura. El desplazamiento se produce entre dos cabezales (maestro y esclavo) situados en los extremos de la splice plate (Figura 14).

- **Sistema manual:** está formado por una canaleta, capaz de adaptarse a la compleja geometría de las

juntas. A lo largo de su perímetro dispone de diversas entradas tanto para el gas de respaldo como para la instrumentación para medir la concentración (Figura 15).

- **Sistema particular de biscuits:** consiste en un dispositivo que se ubica en la parte posterior de la biscuit, anclado con un tetón a la misma, consiguiendo la protección necesaria durante el proceso de soldadura al proyectar argón a lo largo de todo su perímetro sobre la zona a soldar (Figura 16).

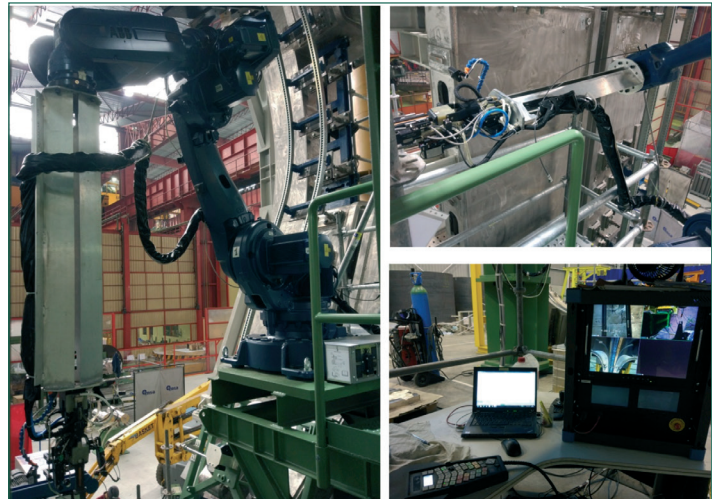


Figura 13. Sistema de soldadura.

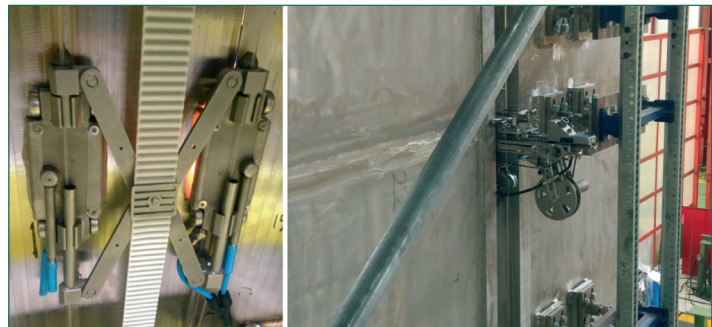


Figura 14. Sistema automático de gas de respaldo.

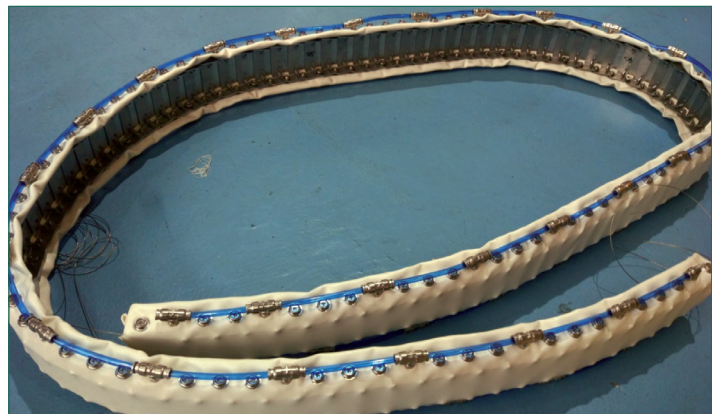


Figura 15. Sistema manual de gas de respaldo.

Todos estos sistemas se han venido testeando en maquetas de escala reducida, maquetas a escala real y en diversas configuraciones de posición, geometría y desalineamiento, con resultados satisfactorios.

Ensayos no destructivos de splice plates

Es requisito del código que aplica (RCC-MR 2007) el realizar la inspección visual, de líquidos penetrantes y volumétrica (radiografía o ultrasonidos) del 100% de las soldaduras del proyecto.



Figura 16. Sistema de gas de respaldo en biscuit.

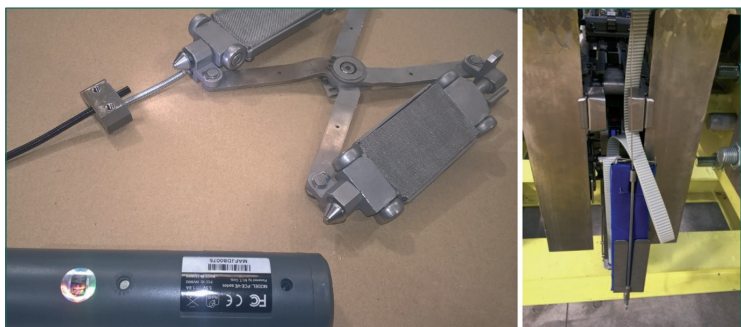


Figura 18. Sistema de inspección visual y de posicionado de película de RT.



Figura 17. Sistema de mecanizado en sectores para el resanado.



Figura 19. Sistemas porta-palpadores de UT.



Figura 20. Alojamiento de biscuit.

Derivado de esto, se necesita realizar el resanado del sobrecordón resultante tras el proceso de soldadura. Por esto, se ha desarrollado un equipo de mecanizado que comparte el mismo sistema de desplazamiento que el posicionador de *splice plates*, sobre raíles.

El desarrollo de esta función en el equipo ya ha sido completado y validado internamente, con resultados satisfactorios (Figura 17).

Para la inspección visual de la raíz se ha aprovechado el mismo sistema automático para el gas de respaldo, el cual, con un soporte añadido, es capaz de hacer circular el endoscopio por toda la longitud posterior soldada de la *splice plate* (Figura 18).

Del mismo modo, para la inspección por líquidos penetrantes, hemos fabricado unos extensores que nos permiten hacer frente a las

profundidades a las que hay que realizar la prueba (hasta 1500 mm) y el limitado acceso para la misma (160 mm).

Al igual que sucedía para la inspección visual, se ha diseñado un soporte especial a partir del carrito que permite transportar y fijar la película sobre la que se proyectará la radiografía en cualquier posición del sector o los puertos.

Para la inspección por UT, se han diseñado y fabricado cuatro dispositivos de manejo de los palpadores para facilitar la prueba en cualquier área y para cualquier configuración y geometría. Actualmente, se están comenzando las pruebas de estos equipos en las maquetas de escala real (Figura 19).

Mecanizado de *biscuits* y fabricación

Finalizada la soldadura e inspección de las *splice plates* se procederá a realizar las uniones entre las mismas. Para ello, primero es necesario mecanizar el alojamiento sobre el que se soldará posteriormente la *biscuit* (Figura 20).

Esta tarea se realiza con el sistema de mecanizado desarrollado en el apartado anterior para el caso de *biscuits* situadas entre sectores y mediante robots si la zona a mecanizar corresponde a alguno de los puertos.

Una vez mecanizado el agujero de la futura *biscuit* se realiza un es-



caneado 3D de dicho alojamiento para, tras acometer la ingeniería inversa del mismo, proceder a fabricar a medida la *biscuit*, siguiendo el mismo proceso que en la fabricación de las *splice plates*.

Soldadura de *biscuits*

La soldadura de *biscuit* es un caso particular que implica una soldadura automatizada, circular, con diámetros que pueden variar desde 105 a 260 mm (Figura 21).

Para ello, se dispone de un cabezal de soldadura que se fija a la propia *biscuit* y rota sobre dicho punto de anclaje permitiendo, no solo realizar la maniobra en círculo, sino también absorber los posibles desalineamientos que tenga la pieza.

Ensayos no destructivos de *biscuits*

Los ensayos no destructivos en *biscuits* es una actividad totalmente análoga a la que se ha desarrollado previamente para *splice plates* donde varía la geometría y la secuencia de trabajo de la máquina de mecanizado de sectores.

Reparaciones

Cualquier soldadura, independientemente de su sencillez o de la experiencia en realizarla, está sujeta a necesidades de reparación en algún momento de la misma. Esta circunstancia se ve agravada cuanto más complejo sea el acceso y la geometría, máxime si no se dispone de acceso a la parte posterior de la misma.

Por ello, se ha desarrollado una rutina de reparación en la máquina de mecanizado que permite realizar una excavación que es compatible con las condiciones de funcionamiento de nuestra soldadura automatizada (Figura 22).

Las pruebas preliminares realizadas han sido satisfactorias y queda pendiente su validación en las maquetas de escala real.

CONCLUSIONES

Las actividades descritas a lo largo de las secciones anteriores han pre-

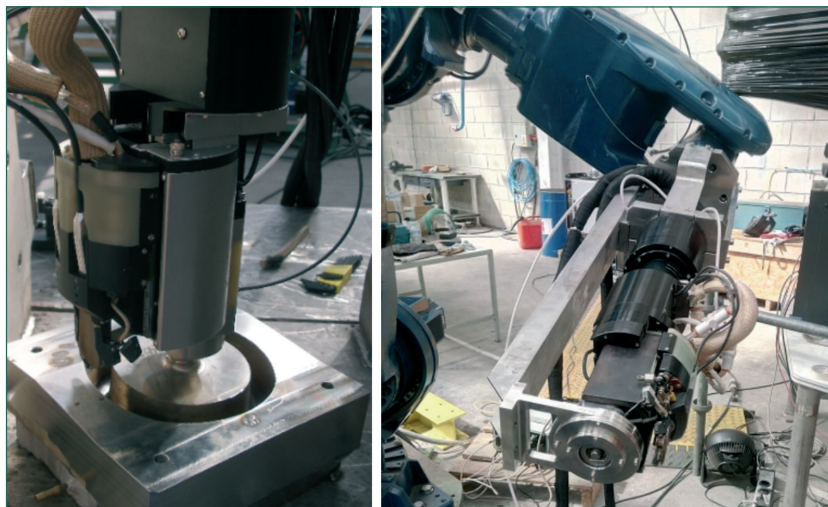


Figura 21. Cabezal de soldadura de *biscuit*.

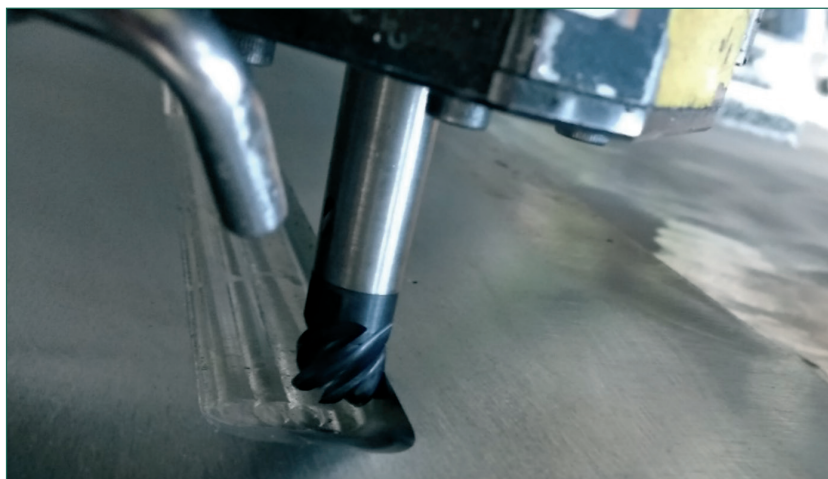


Figura 22. Proceso de reparación en maqueta escala 1:1.

tendido dar una visión global de un proyecto que se encuentra en fase experimental, siendo un desarrollo único en la historia de la humanidad.

Se ha pretendido divulgar los trabajos realizados por ENSA dentro del proyecto global, para mejorar los equipos, las técnicas y los procesos, que permitan a ITER llegar a la fase de producción con las máximas garantías de éxito. En este sentido, todas las actividades realizadas en las maquetas a escala real sirven para ayudar al desarrollo, mejora y adaptación de todos los equipos para su adecuación a las necesidades de campo.

AGRADECIMIENTOS

La buena marcha de un proyecto como el que nos ocupa, 100% de tipo experimental y de una gran envergadura, no sería posible sin la ayuda y colaboración diaria de todos los departamentos involucrados.

Así pues, a todo el equipo de proyecto, soldadura, automática, calidad, ingeniería, compras, PRL... a todos y cada uno de ellos y también a nuestros subcontratistas y colaboradores externos, muchas gracias por el esfuerzo y la dedicación.

Para más información sobre la cámara de vacío: www.iter.org/mach/vacuumvessel ■