



Centro Nacional de Tecnologías para la Fusión

Informe Científico – Técnico

Julio 2009

Autores y Contribuciones

Este documento no podría haberse preparado sin la contribución entusiasta de un grupo numeroso de investigadores de hasta siete Universidades y Centros de investigación diferentes a quienes estamos enormemente agradecidos por su ayuda y soporte durante estos dos últimos años:

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de Madrid (CIEMAT): J. M. Arroyo, F. Carbajo, N. Casal, P. Fernández, J. Ferreira, A. García, I. García-Cortés, M. González, M. Hernández, M. T. Hernández, A. Ibarra, D. Jiménez, A. Moroño, F. Mota, C. Ortiz, V. M. Queral, L. Ríos, R. Román, F. Tabarés, V. Tribaldos, J. P. de Vicente, R. Vila. *Universidad Politécnica de Madrid (UPM):* A. Abánades, R. Aracil, C. Arévalo, O. Cabellos, D. Díaz, S. Domingo, M. Ferré, L. Gámez, R. González, N. García, Y. Herreras, A. Lafuente, P. Martel, E. Martínez, J. M. Martínez-Val, E. Mínguez, J. Y. Pastor, M. Perlado, E. Río, J. Sanz, F. Sordo, M. Velarde, M. Victoria. *Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED):* M. García, D. López, A. Mayoral, F. Ogando, J. Sanz, P. Sauvan. *Universidad Carlos III de Madrid (UC3M):* D. Blanco, L. Moreno, M. A. Monge, R. Pareja. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC):* P. González, J. de No. *Universidad Autónoma de Madrid (UAM):* A. Climent, A. Muñoz. *Universidad de Alicante (UA):* M. J. Caturla

Coordinación General: A. Ibarra (CIEMAT), M. Perlado (UPM)
Coordinación Grupo de Producción y Procesado de Materiales: R. Pareja (UC3M)
Coordinación Grupo de Irradiación de Materiales: R. Vila (CIEMAT)
Coordinación Grupo de Interacción Plasma-Pared: F. Tabarés (CIEMAT)
Coordinación Grupo de Tecnología de Metales Líquidos: A. Abánades (UPM)
Coordinación Grupo de Técnicas de Caracterización: M. González (CIEMAT)
Coordinación Grupo de Tecnologías de Manipulación Remota: R. Aracil (UPM)
Coordinación Grupo de Simulación Computacional: J. Sanz (UNED, UPM)
Gestión de proyecto y Edición: D. Jiménez, R. Román, I. García-Cortés (CIEMAT)

Resumen Ejecutivo

El desarrollo de la fusión como una fuente de energía se está convirtiendo en una necesidad vital debido al continuo aumento del consumo energético mundial. La fusión es una de las pocas opciones energéticas inagotables, respetuosas con el medio ambiente y capaces de cubrir la demanda previsible de energía.

El desarrollo de la fusión es uno de los grandes retos tecnológicos de la humanidad. Para la Unión Europea (UE) este campo es uno de sus principales programas de investigación, como demuestra el que en junio de 2005 acordara junto a EE.UU., Rusia, China, Corea del Sur, Japón y la India, la construcción del proyecto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). ITER, que significa camino en latín, es un reactor experimental cuyo propósito será demostrar la viabilidad científica de la fusión.

Con el diseño de ITER ya finalizado, en los próximos 20-30 años se producirá un gran aumento, **no tanto en la investigación básica en física de plasmas como en el desarrollo tecnológico de los componentes de los futuros reactores comerciales de fusión**. La selección, desarrollo y ensayo de los materiales y elementos de los diversos sistemas del reactor son el desafío más importante de la investigación en fusión, junto al diseño de los sistemas de extracción de energía y reproducción de tritio.

España tiene una oportunidad única de estar a la cabeza de la participación europea en este novedoso campo tecnológico y para ello requiere nuevas instalaciones en las que poder simular las condiciones extremas a las que se verán sometidos los materiales y/o componentes en el interior de un reactor de fusión.

El proyecto que se describe en este informe pretende la construcción, en la Comunidad de Madrid, de una Instalación Científico-Técnica Singular (Centro Nacional de Tecnologías para la Fusión – *TechnoFusión*) en la que se concentren infraestructuras apropiadas para el desarrollo de las tecnologías necesarias para los futuros reactores comerciales de fusión y garantizar una destacada participación española tanto de grupos de investigación como de empresas.

TechnoFusión no supondrá un salto en el vacío. La comunidad científica española ya cuenta con la masa crítica de expertos en la ciencia y las tecnologías necesarias para el desarrollo de este ambicioso proyecto, como sobradamente demuestra la experiencia de décadas que España posee en el campo de la fusión. *TechnoFusión* persigue precisamente aprovechar las capacidades existentes en grupos de investigación de universidades, OPIs y empresas y enfocarlos en las áreas que se consideran prioritarias como la creación, ensayo y análisis de los materiales que se precisan para el desarrollo de un reactor comercial de fusión termonuclear, o su compleja manipulación remota.

Las condiciones que deberán soportar los componentes del reactor y las propiedades que de ellos se esperan los sitúan en un terreno desconocido que

precisamente *TechnoFusión* pretende explorar. Por ello se propone la construcción de aquellas instalaciones necesarias para la fabricación, prueba y análisis de los materiales más críticos, así como para impulsar el desarrollo de simulaciones numéricas para el estudio del comportamiento de dichos materiales bajo condiciones tan exigentes.

Más concretamente los esfuerzos en *TechnoFusión* se concentrarán en la creación de infraestructuras para abordar las siguientes áreas de investigación: 1) *producción y procesamiento de materiales*, 2) *irradiación de materiales*, 3) *interacción plasma-pared (cargas térmicas sobre materiales y mecanismos atómicos de daño)*, 4) *tecnología de metales líquidos*, 5) *técnicas de caracterización*, 6) *tecnologías de manipulación remota* y 7) *simulación computacional*. Para ello se propone la construcción de un gran Centro científico-técnico de investigación, *TechnoFusión*, constituido como una única instalación singular con capacidades para desarrollar estas siete grandes áreas de investigación que a continuación se describen:

1) *Producción y Procesado de Materiales*. Los materiales con los que se fabricarán los futuros reactores de fusión aún no se han decidido, en parte debido a que todavía no se han reproducido las condiciones extremas que tendrán que soportar. Por lo tanto, es de la mayor importancia contar con instalaciones que permitan la fabricación de nuevos materiales a escala semiindustrial y a nivel de prototipo. Entre los de mayor prioridad identificados se encuentran los materiales metálicos tales como los aceros de baja activación reforzados del tipo ODS (*Oxide Dispersion Strengthened steels*) y las aleaciones de tungsteno. Para su fabricación se dispondrá de equipos que actualmente son escasos o no existen en España como por ejemplo un Horno de Inducción a Vacío (VIM), un Horno de Prensado Isostático en Caliente (HIP), un Horno de Sinterización Asistida por Corriente de Plasma Pulsada (SPS) o un Sistema de Proyección por Plasma en Vacío (VPS).

2) *Irradiación de Materiales*. Reproducir exactamente las condiciones del interior de un reactor sólo será posible en un verdadero reactor. Aún así es factible simular los efectos que los neutrones y la radiación *gamma* producirán sobre los materiales irradiando éstos con iones y electrones. La simulación de la radiación neutrónica se realizará mediante el uso simultáneo de tres aceleradores de iones: un acelerador de iones ligeros tipo tándem de 6 MV para la irradiación con He, un acelerador de iones ligeros tipo tándem de 5-6 MV para la irradiación con H (ó D) y un acelerador de iones pesados de tipo ciclotrón de $k = 110$ para la implantación de iones pesados (Fe, W, Si, C) o de protones de alta energía. Adicionalmente, se contará con un imán de alto campo (5-10 T) para el estudio del efecto simultáneo de la irradiación y el campo magnético sobre los materiales. La simulación del efecto de la radiación ionizante, *gamma*, se realizará mediante un acelerador de electrones de energía fija de tipo Rhodotron de 10 MeV, cuyo uso será compartido con otras áreas de la Instalación.

3) *Interacción Plasma-Pared*. En un futuro reactor de fusión, además de la radiación, algunos materiales estarán expuestos a enormes cargas térmicas por su interacción con el plasma. Debido a ello, será imprescindible no sólo reproducir las condiciones estacionarias de alta densidad, baja temperatura y alta potencia sino también probar los materiales ante eventos transitorios violentos (conocidos como ELM's en la literatura de física de plasmas). Se prevé contar con dos dispositivos de generación de plasma: una máquina lineal de plasma, encargada de reproducir las condiciones estacionarias, y un acelerador lineal de plasma cuasiestacionario QSPA

(*Quasi-Stationary Plasma Accelerator*) que simulará los transitorios. Ambos serán capaces de generar plasmas de H, D, He y Ar.

4) Tecnología de Metales Líquidos. La utilización de metales líquidos como el litio en distintos componentes de ITER e IFMIF¹, y a más largo plazo, en los futuros reactores de fusión, hace que las tecnologías asociadas tengan un interés creciente. Su uso como refrigerante, productor de tritio, reproductor neutrónico o como moderador en condiciones extremas no está suficientemente estudiado. Esta área de experimentación contará con varios circuitos de litio líquido acoplados al acelerador de electrones con los objetivos principales de estudiar la superficie libre de metales líquidos con deposición interna de calor y la compatibilidad de los materiales estructurales con el metal líquido en presencia de radiación. Además se podrá investigar la influencia de la presencia de campos magnéticos en dichos fenómenos y desarrollar las tecnologías asociadas a los métodos de purificación del metal líquido, técnicas de enriquecimiento del litio, sistemas de extracción de tritio y aspectos de seguridad del metal líquido.

5) Técnicas de Caracterización. Se propone para el Centro un conjunto amplio de técnicas para la caracterización exhaustiva de materiales comerciales o desarrollados en la propia instalación antes, durante y después de su exposición a la radiación o a las cargas térmicas. Se contará para ello con una gran variedad de métodos de caracterización mecánica (máquinas electromecánicas, minimáquinas de ensayos mecánicos, máquinas de fluencia térmica, técnicas de nanoindentación, etc.), composicional (Espectrometría de Masas de Iones Secundarios (SIMS) y Sonda Atómica Topográfica (APT)), estructural y microestructural (Microscopía Electrónica de Alta Resolución (HRTEM) y Difracción de Rayos X (DRX)) o de procesamiento de materiales (Sistemas de Haces de Iones Focalizados acoplado a un Microscopio Electrónico de Barrido (FIB/SEM)). Se dispondrá también de diversos sistemas para la caracterización de las propiedades físicas (eléctricas, dieléctricas, ópticas, etc.). *TechnoFusión* aspira a convertirse en el laboratorio nacional de referencia en la caracterización de materiales, ya que algunas de las técnicas anteriormente mencionadas, como el SIMS o la APT, no se encuentran fácilmente disponibles en España.

6) Tecnologías de Manipulación Remota. Las condiciones en el interior de un reactor de fusión serán incompatibles con la reparación o sustitución de sus componentes manualmente, siendo imprescindible su manejo por manipulación remota. Así, es de la máxima importancia no sólo el desarrollo de nuevas técnicas robóticas, compatibles con estas condiciones hostiles, sino también la acreditación de las existentes para su uso en instalaciones como ITER o IFMIF. El tamaño de los componentes que se van a usar y las dificultades de su disposición en el espacio del que se dispone provoca la necesidad de desarrollos hasta ahora no considerados en las técnicas de manipulación. Se contará con una instalación, acoplada al acelerador de electrones, donde los prototipos experimentarán condiciones de trabajo con radiación *gamma* similares a las esperadas durante las tareas de mantenimiento de un reactor. Por otra parte, algunos de los prototipos considerados para la demostración de la manipulación remota son: los *Port Plugs* (PP) de diagnóstico y los *Test Blanket Modules* (TBM) de ITER, o los módulos de irradiación de IFMIF.

¹ IFMIF es una fuente de neutrones de alta intensidad y espectro equivalente al de un reactor de fusión. En el diseño final consta de dos aceleradores de deuterones que inciden sobre un blanco de Li líquido donde por reacciones nucleares de *stripping* se genera un espectro neutrónico de características similares a las del reactor)

4. Área de Producción y Procesado de Materiales

4.1. Introducción

Los materiales claves en un reactor de fusión son aquéllos que forman parte de su estructura soporte, la cámara de vacío, la primera pared enfrentada al plasma con el *blanket*, el criostato y las bobinas superconductoras, y otros elementos de sustentación, fijación, etc. La interacción del plasma con los materiales de la vasija, o aquéllos relativamente próximos a él, supondrá un problema importante debido a las elevadas tasas de radiación y altos flujos de calor a los que estarán sometidos. La pared que envuelva el plasma será irradiada por partículas cargadas de muy alta energía, radiación electromagnética muy intensa y neutrones con energías de hasta 14 MeV. Todo esto tendrá capacidad suficiente para modificar las propiedades de los materiales en mayor o menor grado, rápida o lentamente, dependiendo de su proximidad al plasma. Este es probablemente el problema más urgente a resolver para transformar la fusión nuclear en una fuente de energía segura y económica. Los elementos cercanos al plasma deberán trabajar en condiciones extremas para que se alcancen los parámetros de operación de un reactor de fusión rentable. Por tanto, a los materiales para fusión se les debe exigir una combinación de propiedades mucho más amplia que las que hasta el momento se le ha impuesto a los materiales componentes de cualquier sistema de generación de energía, o cualquier otro dispositivo.

Existen tres categorías de materiales que son claves para el desarrollo de la tecnología de fusión:

- a) Los materiales componentes de la primera pared que se han de encontrar enfrentados al plasma (*Plasma Facing Materials*, PFMs).
- b) Los materiales estructurales que formarán parte de los componentes de la primera pared, la cámara de vacío, las bobinas superconductoras, los componentes del sistema de refrigeración, etc.
- c) Los materiales denominados “funcionales” con capacidad para realizar simultáneamente funciones de *breeder* (generador de tritio), de refrigerante o de multiplicador de neutrones. En este apartado, también se consideran los materiales cerámicos que se usen en los sistemas de diagnóstico del plasma.

Los PFMs deben presentar características como una alta conductividad térmica, buena resistencia mecánica y tenacidad, resistencia al daño de la irradiación y a la erosión por el plasma, baja retención de hidrógeno y baja activación inducida, y además no ser magnéticos. Además, deben tener el menor número atómico posible para minimizar el enfriamiento del plasma debido a la radiación. Hasta el momento no se dispone de ningún PFM que cumpla con todos los requisitos de diseño establecidos para estos materiales, siendo los Compuestos de Fibra de Carbono (CFC), el Be y el W, y sus aleaciones, los actuales candidatos a PFMs. Sin embargo, sus propiedades y comportamiento frente al plasma son muy diferentes. Por tanto, es urgente obtener un conocimiento profundo del efecto del plasma y de la radiación en estos materiales con el fin de desarrollar los PFMs de un futuro reactor de fusión.

El W y algunas de sus aleaciones parecen ser los PFMs más prometedores para el divertor por su capacidad para soportar altos flujos de calor y su resistencia a la

erosión por el plasma. También se ha considerado el uso de aceros reforzados con partículas de óxidos (*Oxide Dispersion Strengthened steels*, ODS), pero protegidos por un recubierto de W, como potenciales PFMs. En cualquier caso, el uso del W y sus aleaciones requiere la mejora de sus propiedades mecánicas, y el conocimiento detallado de su comportamiento bajo irradiación y de la estabilidad de su microestructura a altas temperaturas. Esto es necesario, entre otras cosas, por los problemas de formación de polvo y de la fusión del material cuando la potencia es demasiado alta, perdiéndose el ángulo rasante de ataque y haciéndose inservible el divertor.

El problema de los materiales para fusión no se limita sólo a los PFMs. Los materiales que actúan como soporte de la primera pared, del *blanket*, de la vasija de vacío o del sistema de refrigeración también estarán expuestos a condiciones extremas de irradiación, temperatura, tensiones térmicas, y a fluidos a altas temperaturas y presiones. Estos materiales deben tener muy buenas propiedades y además mantenerlas estables en un adecuado intervalo de temperaturas. Se trata de materiales estructurales de baja activación inducida y resistentes al daño producido por irradiación. Entre los potenciales materiales para estas aplicaciones estructurales se encuentran aceros austeníticos como el 316LN-IG modificado específicamente para usar en ITER, los aceros ferrítico-martensíticos de baja activación inducida denominados RAFM (*Reduced Activation Ferritic Martensitic*), nuevos aceros ferríticos con contenidos de Cr de hasta el 14 wt%, aleaciones de V-Ti (V-Ti, V-Ti-Cr, V-Ti-Si), y también *composites* de SiC. Los objetivos de los programa de investigación para estos materiales se centran en mejorar su resistencia mecánica y tenacidad, rebajar la temperatura de transición dúctil-frágil (*Ductile-Brittle Transition Temperature*, DBTT), aumentar su resistencia al daño por irradiación y estabilizar su microestructura mediante dispersión de nanopartículas; en definitiva, ampliar el rango de sus temperaturas de trabajo.

Entre los potenciales materiales funcionales se encuentran el Be, Pb y las aleaciones Be_{12}Ti y Be_{12}V como multiplicadores de neutrones. Como materiales reproductores de tritio se han propuesto Li, Li-Pb, Li-Sn, que también actuarían como refrigerante, y cerámicas basadas en Li_2O . En el caso de los materiales cerámicos de fusión, la investigación debe centrarse en propiedades como la retención de tritio, conductividad térmica, resistividad, características ópticas e integridad estructural después de irradiación.

En la actualidad el desarrollo e investigación de los materiales de fusión se complica al no poder investigar en detalle los efectos de la radiación con neutrones de 14 MeV, y de la exposición al plasma de un reactor de potencia, ya que todavía no existen infraestructuras para realizar estos experimentos. Parte de la solución a este problema se busca con la futura construcción y puesta en marcha de IFMIF. Otro gran obstáculo en el desarrollo de los materiales para fusión es su producción a escala industrial. Actualmente, y salvo casos excepcionales, los materiales con propiedades adecuadas para su uso en los reactores de fusión sólo se producen a escala de laboratorio. Esto se debe principalmente a que la industria requiere unas especificaciones y normas concretas antes de lanzarse a la producción de materiales, al alto coste de los mismos y a que los fabricantes son reacios a su investigación y desarrollo por considerar inexistente la demanda comercial actual. Debido a estos inconvenientes, el desarrollo actual de los materiales para fusión recae en laboratorios financiados con fondos públicos asociados a los organismos responsables de la coordinación de los programas internacionales de fusión. En esta situación, los

resultados obtenidos con materiales producidos a escala de laboratorio presentan una elevada dispersión debido a las diferencias de composición, técnicas de producción, procesado, limitación en las cantidades de material, etc., a consecuencia de fabricar el material en distintos laboratorios.

Los asesores y coordinadores del programa europeo de materiales de fusión lamentan la falta de interés de las industrias europeas por producir materiales de fusión para los laboratorios de investigación. También, han señalado la falta de laboratorios de investigación con capacidad para fabricar, en una sola tirada, una cantidad de material suficiente para realizar su caracterización completa por parte de los grupos encargados de la investigación del correspondiente material. En el Programa Europeo se ha sugerido la necesidad urgente de que algunos laboratorios de Europa dispongan de la capacidad de fabricar de una sola tirada tal cantidad de material. Ésta debería ser al menos del orden de 50 kg por tirada, en el caso de tratarse de aceros, o aleaciones de Fe-Cr. En este sentido, el **Área de Producción y Procesado de Materiales (APPM)** de *TechnoFusión* se plantea como respuesta a esta necesidad de la comunidad europea de materiales de fusión.

4.2. Objetivos

Las líneas de investigación del actual Programa Europeo de materiales de fusión centran su actividad a medio y largo plazo (y con carácter prioritario) en el desarrollo e investigación de los siguientes materiales:

- 1) *Aceros de baja actividad inducida y resistentes al daño por irradiación para su uso en el blanket y divertor.* Estos aceros han de tener buenas características mecánicas y estabilidad a altas temperaturas. Entre ellos destacan el EUROFER para el módulo del *blanket* a experimentar en el ITER, u otros aceros nano-estructurados que puedan ser usados en DEMO. El objetivo a corto plazo es la optimización de los aceros de baja activación para su uso en el *blanket* de los futuros reactores. Para más largo plazo, se plantea la investigación de los aceros ODS. Otra de las líneas de investigación propuesta en estos materiales corresponde a los denominados aceros ferríticos nano-estructurados basados en la composición Fe-14 wt% Cr.
- 2) *W y sus aleaciones ODS para su uso en un divertor refrigerado por He,* donde las temperaturas de trabajo podrían estar en el rango de 700 – 1.350 °C. En estos materiales el objetivo es mejorar sus propiedades térmicas aumentando la estabilidad de su microestructura a altas temperaturas, rebajando la DBTT, mejorando la ductilidad a bajas temperaturas y aumentando su capacidad para manejar altos flujos de potencia.
- 3) *Materiales compuestos cerámicos de SiC_f/SiC para su uso en blankets avanzados refrigerados por Li-Pb.* En este tipo de materiales se propone trabajar en nuevos métodos de fabricación y recubrimiento de las fibras para optimizar sus propiedades mecánicas a altas temperaturas, y aumentar la conductividad térmica.
- 4) *Materiales funcionales y recubrimientos.*

Aunque las directrices del actual Programa Europeo de materiales de fusión están orientadas fundamentalmente hacia las tres primeras familias de materiales mencionados, los correspondientes programas puestos en marcha en EE.UU., Japón y Rusia mantienen también activa la investigación en las aleaciones de V-Ti y en una amplia variedad de materiales funcionales con una visión a más largo plazo.

En base a las necesidades encontradas por el Programa Europeo, los principales objetivos del Área Producción y Procesado de Materiales de *TechnoFusión* se propone son:

- Desarrollar la capacidad de fabricar, en el marco del Programa Europeo, materiales de interés en fusión en una cantidad significativa para su adecuada caracterización por diferentes grupos de investigación.
- Producir y procesar materiales requeridos por los usuarios de *TechnoFusión*.
- Fabricar materiales estructurales, aceros, aleaciones modelo Fe-Cr, V-Ti, etc., con los adecuados controles de composición, en cantidades comprendidas entre 2 y 50 kg por fundición mediante la técnica de Fusión por Inducción en Vacío.
- Producir aceros ODS, aleaciones ODS de Fe-Cr, y aleaciones ODS y no ODS de W en cantidades del orden de 2 - 5 kg mediante Aleado Mecánico y consolidación mediante las técnicas de Prensado Isostático en Caliente o Sinterización Asistida por Corriente Continua Pulsada.
- Producir aceros y aleaciones nano-estructuradas, o de grano ultrafino, mediante las técnicas de Prensado Isostático en Caliente y de Sinterización Asistida por Corriente Continua Pulsada.
- Procesar materiales mediante tratamientos termo-mecánicos y de deformación severa como la Extrusión Angular de Sección Constante para mejorar sus características mecánicas
- Fabricar recubrimientos de W puro y cerámicas multifuncionales por la técnica de Proyección de Plasma en Vacío.

Esta Área de investigación de *TechnoFusión* se plantea con la idea de poder proporcionar, en principio, materiales de las tres primeras familias mencionadas. Siguiendo las directrices del actual programa europeo, se deberá concentrar en el desarrollo de las siguientes líneas de materiales:

- 1) Materiales estructurales de baja activación inducida y resistente a la irradiación, concretamente aceros y aleaciones modelo de Fe-Cr, ODS y no ODS.
- 2) W y aleaciones de W, ODS y no ODS, como PFM.
- 3) Materiales funcionales y cerámicos producidos por las técnicas de Prensado Isostático en Caliente y Sinterización Asistida por Corriente Continua Pulsada.

- 4) Recubrimientos mediante la tecnología de Proyección por Plasma en Vacío, y experimentos de soldadura y unión metal-cerámica.

4.3. Situación internacional de las tecnologías propuestas

4.3.1. Estado actual de las tecnologías de producción y procesado de materiales para fusión

(I) Horno de Inducción en vacío

La Fusión por Inducción en Vacío (*Vacuum Induction Melting*, VIM) es una técnica de preparación de aleaciones metálicas que consiste en la fusión y refinado de los metales componentes en un horno de inducción en alto vacío. Los metales se funden en un crisol y la aleación obtenida se prepara en lingotes mediante colada vertiendo en vacío el material fundido en moldes apropiados. Mediante este proceso se producen lingotes de composición muy homogénea, y con un bajo contenido en impurezas gaseosas. El método VIM es el más empleado para la fabricación de aleaciones de elevada pureza de materiales que reaccionan con el aire como son las aleaciones de Ti, Zr y V, y de superaleaciones, así como de otras aleaciones que requieran muy bajo nivel de impurezas intersticiales como O, N, H, P, etc. Frente a los hornos tradicionalmente usados para fabricar aceros, los hornos VIM actualmente en el mercado presentan las siguientes ventajas:

- 1) Es posible producir material en las cantidades comprendidas entre 4 – 50 kg con las composiciones deseadas.
- 2) Permiten producir aceros de alta pureza, aleaciones de Ti, Zr, V y superaleaciones, además de aleaciones de bajo punto de fusión.
- 3) Presentan una gran facilidad y seguridad de operación.
- 4) Ofrecen un control preciso de la composición, temperatura y atmósfera residual.
- 5) Permiten la evacuación de gases en solución y otras impurezas.

El impacto actual de la técnica VIM en el procesado y fabricación de materiales se resume en el diagrama de la Figura 4.1.

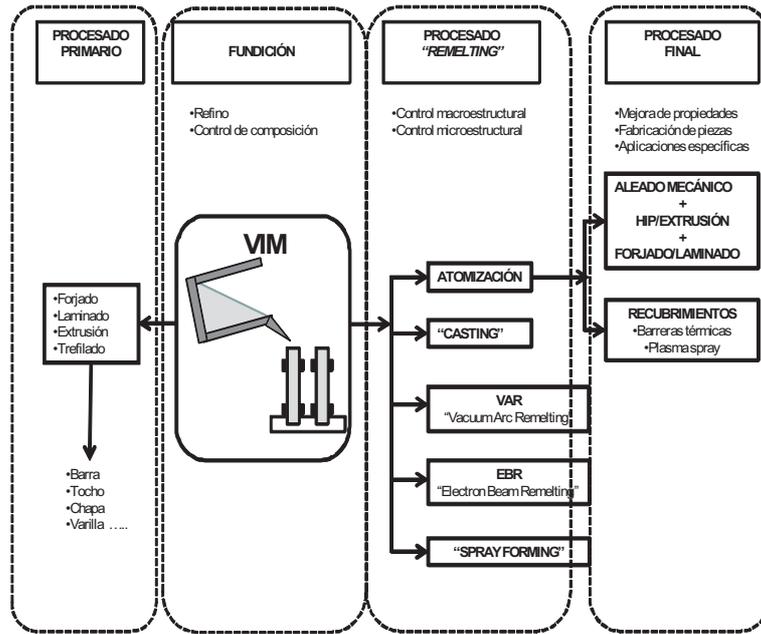


Figura 4.1. Aplicaciones de la técnica VIM en el procesado y fabricación de materiales.

(II) Horno de Prensado Isostático en Caliente

La técnica de Prensado Isostático en Caliente (*Hot Isostatic Pressing*, HIP), consiste en la aplicación simultánea de calor y presión isostática a un material para producir su consolidación, densificación y eliminación de la porosidad residual. También se aplica para unir mediante interdifusión materiales difíciles de soldar o unir. La técnica se aplica tanto a metales como a cerámicas y materiales compuestos de matriz metálica o cerámica.

La tecnología HIP es de gran interés en la investigación y desarrollo de los materiales para fusión, tanto metálicos como cerámicos. Aunque inicialmente fue desarrollada en tecnología nuclear para unir materiales difíciles de soldar mediante difusión, actualmente su aplicación se ha extendido a todos los campos de la fabricación de materiales de manera que por HIP pueden producirse lingotes y piezas de materiales metálicos y cerámicos libres de porosidad. En el proceso de fabricación el material, con la forma deseada, se somete simultáneamente a altas temperaturas y presiones isostáticas, típicamente superiores a 1.000 °C y 90 MPa. En caso de partir de material en polvo, se puede obtener el material perfectamente consolidado, y completamente denso e isótropo, lo que supone una gran ventaja respecto a la sinterización convencional y otras técnicas de consolidación como la extrusión. Para ello, el polvo se ha de encapsular previamente. Además, esta técnica se usa para eliminar la porosidad residual en componentes fabricados mediante sinterización convencional o por fundición y colada, así como para realizar conformado, soldadura y

recubrimientos de materiales. Si se desea fabricar componentes con formas complejas y dimensiones precisas, se usan piezas previamente sinterizadas¹⁴ o moldeadas.

Esta técnica permite fabricar no sólo lingotes de materiales con composiciones y microestructura que no podrían obtenerse por fundición, forjado o extrusión, sino también piezas de estos materiales con geometría complicada y de dimensiones precisas, y soldarlos a otros materiales. La posibilidad presente de construir hornos capaces de operar a temperaturas cercanas a los 2.200 °C, bajo presiones de hasta 400 MPa, hace que el HIP sea la tecnología que actualmente se aplica en el desarrollo de nuevas aleaciones de metales refractarios, y de cerámicas avanzadas como SiN₂, SiC o B₄C, de gran interés en la tecnología de fusión.

(III) Horno de Sinterización Asistida por Corriente de Plasma Pulsada

La técnica de síntesis y consolidación de materiales mediante Corriente de Plasma Pulsada (*Spark Plasma Sintering*, SPS) surgió como una alternativa al Prensado Isostático en Caliente.

Las últimas mejoras de los sistemas SPS han hecho que esta técnica probablemente sea la más adecuada, entre las que actualmente existen, para fabricar materiales nano-estructurados, tanto cerámicos como metálicos. Mediante este proceso el material se consolida rápidamente gracias al calentamiento por efecto *Joule* producido por el paso de densidades de corriente muy altas a lo largo del material, al tiempo que se mantiene bajo compresión. La aplicación de pulsos de corriente continua favorece la activación de la sinterización en virtud de los procesos de formación de plasma y electromigración inducidos por la alta densidad de corriente que se establece en los puntos de contacto entre las partículas de polvo. Se requiere un sistema de SPS con capacidad para fabricar materiales cerámicos, aleaciones metálicas refractarias, y materiales funcionales con composición modificada gradualmente.

Además, al igual que el HIP, esta técnica de SPS también se puede aplicar para recubrimientos y soldadura.

(IV) Sistema de Proyección por Plasma en Vacío

La técnica de Proyección por Plasma en Vacío (*Vacuum Plasma Spraying*, VPS) consiste en la inyección de polvo metálico o cerámico de tamaño de partícula entre 10 y 50 µm en un plasma gaseoso caliente (aproximadamente 10.000 K) que lo funde y proyecta sus gotas fundidas a alta velocidad sobre un sustrato para formar el recubrimiento. Este plasma se crea estableciendo un arco eléctrico entre el cátodo de W tipo dedo y un ánodo de Cu tipo boquilla dentro de la antorcha del plasma (pistola de plasma). Tras la evacuación, la cámara del spray se llena con un gas inerte y se mantiene a baja presión durante la pulverización para permitir la producción de recubrimientos sin que se produzca oxidación. La alta velocidad de las gotas y la baja

¹⁴ La sinterización es un proceso de fabricación de piezas a partir de la compactación de polvos de material mediante la acción del calor y la presión.

oxidación asociada a la técnica permite la fabricación de recubrimientos con una densidad relativa próxima al 100%. Esta técnica de fabricación en vacío es preferible a la opción de atmosférica (*Atmospheric Plasma Spray, APS*) para los materiales que son sensibles a la oxidación. Otra ventaja de la tecnología VPS es la opción de limpiar y tratar la superficie del sustrato utilizando la descarga de arco entre la pistola del plasma y un sustrato conductor. La preparación adecuada de las superficies proporciona una mejor adhesión entre el recubrimiento y el sustrato. Los recubrimientos obtenidos utilizando este proceso se caracterizan por su bajo nivel de impurezas y alta densidad, y por una estructura que en algunos casos se asemejan a la de los fundidos. Los espesores típicos de la capa protectora están entre 20 μm y 2 mm, aunque es posible crear recubrimientos mucho más gruesos. El rango de presiones de trabajo típicas en la cámara oscilan entre 50 y 200 mbar.

Las unidades del VPS están completamente automatizadas a través de un microprocesador. La manipulación de la pistola y sustrato está controlada numéricamente por robots, lo que permite recubrir piezas de geometría complicada. Para mantener la uniformidad y las propiedades de la capa protectora es necesario un óptimo control de la temperatura en la superficie durante el proceso de pulverizado.

La técnica VPS es especialmente interesante para producir los recubrimientos protectores de los PFM. Esto se debe a que esta técnica de fabricación mejora las propiedades físicas de los aceros de baja activación en cuanto su resistencia a la radiación, disipación de calor, etc. Mediante VPS es posible formar además recubrimientos de cerámicos ligeros no oxidicos como B_4C o láminas finas de W. Asimismo, permite la fabricación de recubrimientos con un gradiente en su composición para mejorar su adhesión al sustrato.

4.3.2. Instalaciones de referencia internacionales en tecnologías de producción y procesado de materiales para fusión

Tal como se ha mencionado con anterioridad, la producción y procesado de materiales para fusión de las características propuestas es una demanda urgente del actual Programa Europeo de desarrollo de materiales de fusión. En la actualidad, son escasos los Centros dedicados a la investigación de estos materiales que disponen de infraestructuras con capacidad de producir y procesar las cantidades que requieren los programas de caracterización de cualquier material con aplicaciones potenciales en tecnología de fusión. Gran parte de los Centros donde se concentra la actividad investigadora en este campo no disponen de infraestructuras con capacidad para producir y procesar materiales a un nivel similar al que se propone para *TechnoFusión*.

Entre los Centros internacionales donde se dispone de algunas de las técnicas de fabricación y procesado propuestas para *TechnoFusión*, se encuentran:

- El *Oak Ridge National Laboratory (Materials Science and Technology Division)*, en EE.UU.
- El *Forschungszentrum Karlsruhe FZK (Institute for Materials Research I, II and III)*, en Karlsruhe (Alemania).

- El CEA/ *Direction des Sciences de la Matière*, en Grenoble, (Francia)

4.4. Equipamiento previsto

El Área de Producción y Procesado de Materiales de *TechnoFusión* estará dividida en tres áreas menores diferentes, con el siguiente equipamiento particular para cada una de ellas:

- Área de fundición y procesado de metales:
 - Horno VIM
 - Máquinas para procesado y tratamientos termomecánicos: *swaging*, laminado, forjado, extrusión, etc.
- Área de pulvimetalurgia y materiales cerámicos:
 - Horno HIP
 - Horno SPS
 - Sistema de recubrimiento VPS
 - Molinos atritores y planetarios
 - Prensa de compactación isostática en frío
 - Hornos de vacío y atmósfera controlada
- Área de análisis y control:
 - Equipos para el análisis y control de los materiales fabricados.

4.4.1. Horno de inducción en vacío

Este horno estará dedicado a la producción de aceros, aleaciones de Fe-Cr y otras aleaciones.

El proceso de fundición por inducción en vacío es el método más común para producir aceros y aleaciones de alta pureza con composición controlada, una reducción efectiva de las impurezas gaseosas y de la formación de partículas de óxidos que degradan las propiedades mecánicas. Las características básicas y los accesorios requeridos para el horno VIM de *TechnoFusión* son:

- Volumen de carga crisol: ~ 3 - 8 l
- Carga máxima de acero: ~ 50 kg
- Potencial del horno: ~ 100 kW
- Vacío final: 1×10^{-5} mbar
- Velocidad de bombeo: 6 m³/min

Accesorios:

- Cámara para colada y precalentamiento de moldes en vacío.
- Sistema de agitación magnética para homogeneización del fundido.
- Sistemas automáticos de carga.
- Sistemas de medida de la temperatura y presión.

Teniendo en cuenta las anteriores características, se ha pensado en la adquisición de un horno VIM de la casa comercial ADL (*Leybold-Heraeus*). No existen modelos comerciales de estos hornos si no que se diseñan y fabrican por encargo en función de las necesidades del laboratorio en cuestión. Para el Área APPM de *TechnoFusión* se proponen dos diseños del horno de inducción:

a) Horno VIM-VMC con cámara de colada vertical (Figura 4.2)

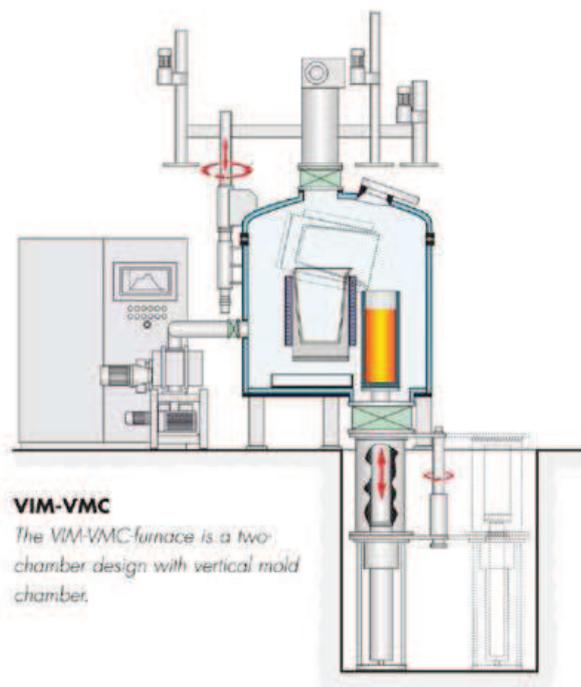
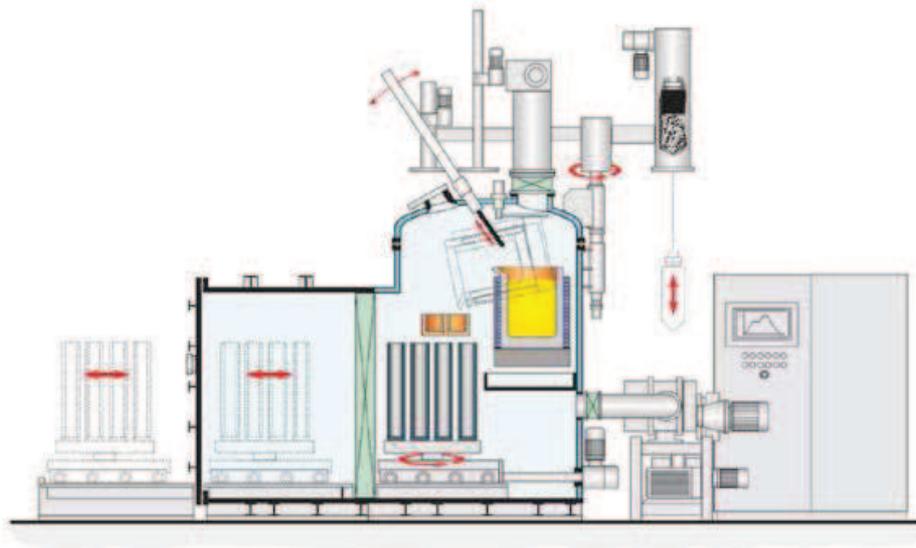


Figura 4.2. Esquema de un horno VIM-VMC con cámara de colada vertical.

b) Horno VIM-HMC con cámara horizontal de calentamiento de moldes y colada en vacío (Figura 4.3)



VIM-HMC

Typical charge weights: 0.5 to 20 tons; two-chamber system with horizontal mold chamber.

Figura 4.3. Esquema de un horno VIM-HMC con cámara de vacío para calentamiento de moldes y colada.

4.4.2. Horno de prensado isostático en caliente

El horno HIP se utilizará para la compactación de materiales metálicos, cerámicas estructurales y funcionales y para la preparación de uniones y recubrimientos. Por ello las características básicas que requerirá el horno HIP de *TechnoFusión* son:

- Presión máxima de trabajo: 400 MPa
- Temperatura máxima de trabajo: 2.200 °C – 2.200 °C
- Dimensiones de la zona caliente: ~200 mm Ø×800 mm; mínimo 140 mm Ø×250 mm

Actualmente en el mercado existe dos opciones de horno HIP con las anteriores características:

- a) El modelo AIP10-60H de *American Isostatic Presses*¹⁵ (Figura 4.4). Este horno tiene una zona caliente de dimensiones 140 mm x 254 mm, trabaja con una

¹⁵ <http://www.aiphp.com/WebPages/hip.htm>.

presión de hasta 414 MPa (60.000 psi) y con una temperatura máxima de hasta 2.200 °C.



Figura 4.4. Horno HIP modelo AIP10-60H de American Isostatic Presses.

- b) Otra opción es el modelo de horno QIH21 de *Avure Technologies*¹⁶ para investigación y producción piloto (Figura 4.5). La zona caliente de este horno es de 250 mm de diámetro y 900 mm de altura, lo que permite preparar lingotes de más de 5 kg. Las dimensiones de este horno se muestran en la Figura 4.6.



Figura 4.5. Horno HIP modelo QIH21 de Avure Technologies.

¹⁶ <http://www.hasmak.com.tr/tozpdf/Avure-HIP-Brochure.pdf>.

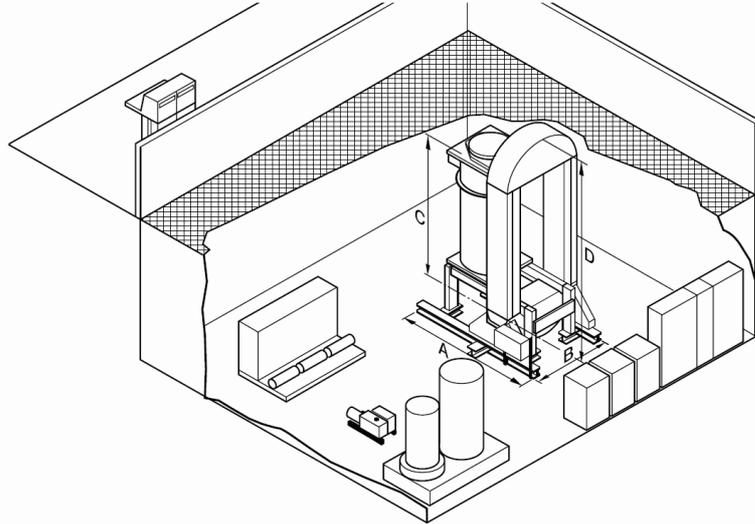


Figura 4.6. Dimensiones de la instalación del horno HIP QIH21 para producción piloto. A = 1.9 m; B = 1.4 m; C = 2.7 m; D = 3.5 m

4.4.3. Horno de sinterización asistida por corriente de plasma pulsada

El horno SPS pensado para *TechnoFusión* se empleará para la compactación ultra rápida y fabricación de materiales nano-estructurados y funcionales (aleaciones ODS, materiales FGM, composites, cerámicas estructurales y funcionales, etc.) y para la unión de recubrimientos.

Este horno deberá tener las siguientes características básicas:

- Temperatura máxima de trabajo: ~ 2.200 °C
- Fuerza máxima: ~ 1.250 kN
- Corriente máxima: 30 kA CC
- Duración del pulso de corriente: 1 – 255 ms
- Sistema para operación en hidrógeno
- Sistema para operación en vacío

En base a estas características se ha pensado en la adquisición de un horno SPS tipo FCT-HPD 125 (Figura 4.7), de la casa comercial *FCT Systeme GmbH*¹⁷. Este equipo posee un molde de dimensiones 200 mm x 300 mm, trabaja con una fuerza máxima de 1250 kN, con una corriente de hasta 30 kA y con a una temperatura máxima de 2.400 °C.



Figura 4.7. Horno SPS modelo FCT-HPD de FCT Systeme GMBH.

4.4.4. Sistema de proyección por plasma en vacío

Esta infraestructura estará dedicada al desarrollo de recubrimientos protectores de PFM's que forman parte de los componentes de la vasija enfrentados al plasma. El sistema de VPS recomendado para *TechnoFusión* debe tener las siguientes características:

- Sistema de rotación libre para manipulación de la pieza a recubrir.
- Cámara para grandes piezas.
- Manipuladores para las piezas y cañón del plasma.
- Sistema para limpieza y tratamiento del sustrato mediante la descarga de arco.

¹⁷ <http://www.fct-keramik.de>

- Cañones de plasma que induzcan el mínimo calentamiento del sustrato bajo las condiciones del recubrimiento.
- Condiciones de recubrimiento variables.
- Velocidades de recubrimiento tan altas como 10 $\mu\text{m}/\text{min}$.
- Potencia del sistema de 180 kW.
- Espesores de recubrimiento en el intervalo de 20 μm – 2 mm.

La compañía puntera en la tecnología de proyección por plasma es *Sulzer Metco*¹⁸ con décadas de experiencia en el desarrollo y fabricación de sistemas VPS. Recientemente esta empresa ha desarrollado una tecnología denominada LPPS®-TF (Figura 4.9), cuyas ventajas en comparación a la proyección de plasma en vacío convencional son:

- 1) El tamaño de la cámara de vacío es mayor de 4 m³ y está orientada en dirección vertical, permitiendo el recubrimiento de áreas muy extensas.
- 2) Las cargas y descargas son muy rápidas, lo que implica que no hay necesidad de romper el vacío.
- 3) El movimiento de la pistola transcurre en cuatro ejes, lo que proporciona una gran flexibilidad.
- 4) La distancia de proyección es variable, entre pocos cm y 1.3 m, lo que permite un amplio rango de condiciones de recubrimiento.
- 5) El sistema de configuración permite recubrimientos en componentes grandes, con superficies de hasta 700x700 mm, y muy distintas morfologías.
- 6) Se pueden realizar multirrecubrimientos añadiendo la plataforma *Advanced Multicoat*, que controla tanto la cámara como la proyección del plasma.

En la Figura 4.8 se muestra un esquema de la disposición del sistema VPS en el interior de la cámara de tipo LPPS propuesto, junto con la forma del chorro de plasma operando en distintas condiciones.

Considerando las características anteriores, se ha pensado en la adquisición para el Área APPM de *TechnoFusión* del sistema SM VPS (Figura 4.9).

¹⁸ www.sulzermetco.com

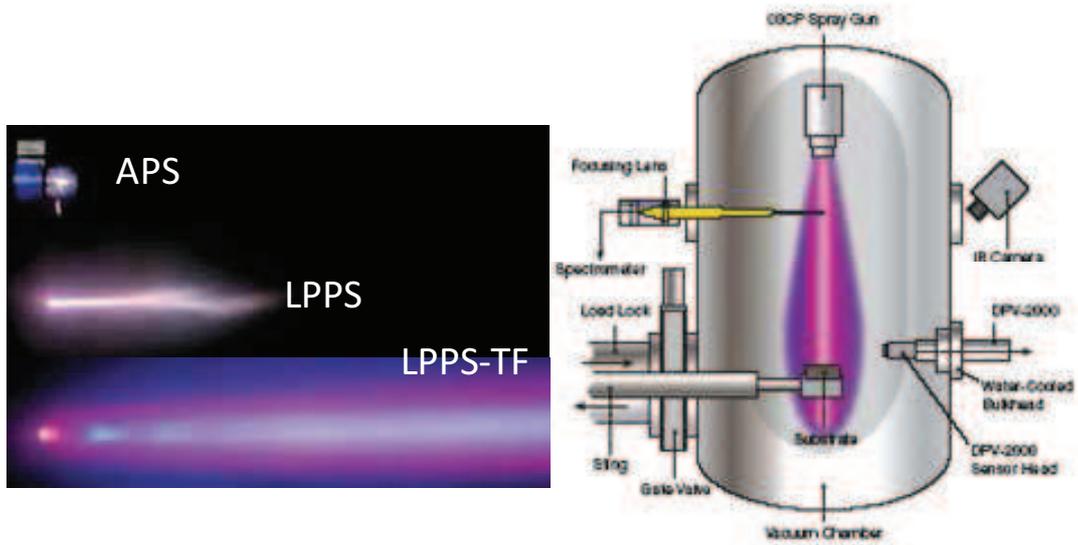


Figura 4.8. (Izquierda) El inyector de plasma de la tecnología LPPS[®]-TF es un orden de magnitud y más amplio que el inyector de plasma tradicional LPPS[®]. El tamaño y la alta entalpía del inyector de plasma LPPS[®]-TF permite el crecimiento rápido del recubrimiento, en capas extremadamente finas y densas lo que confiere propiedades óptimas a lo recubrimiento. (Derecha) Esquema del proceso LPPS[®]-TF.



Figura 4.9. Sistema de Proyección por Plasma en Vacío SM VPS.

4.4.5. Molinos atritores y planetarios

Para el Área APPM de *TechnoFusión* será necesaria la adquisición de un molino de tipo “atritor” para el aleado mecánico de polvos que tenga accesorios para alear en atmósfera inerte o de hidrógeno, y descargar en vacío. Además, serán necesarios varios molinos de tipo planetario para el aleado mecánico así como diversos tipos de vasos para molinos planetarios con sistemas de control de presión y temperatura por radiofrecuencia. Los molinos más adecuados para los requerimientos anteriormente descritos son los ofrecidos por las casas comerciales *Union Process*¹⁹ y *Retsch*²⁰.

Además, será necesario contar en la instalación con una o varias cámaras de guantes para manipular los materiales obtenidos en atmósfera protectora por el aleado mecánico

4.4.6. Prensa de compactación isostática en frío

El Área APPM deberá contar también con una prensa de Compactación Isostática en Frío (*Cold Isostatic Press, CIP*) para preparación de compactos de polvos metálicos y cerámicos. De entre los distintos equipos de compactación ofrecidos por las casas comerciales, para *TechnoFusión* sería recomendable por sus características concretas la adquisición de la prensa AIP3-12-60C (Figura 4.10) de la casa comercial *American Isostatic Presses*²¹. Esta prensa posee una cámara de compactación de unas dimensiones de diámetro de 75 mm x 300 mm y trabaja con presiones de hasta 414 MPa.



Figura 4.10. Prensa CIP modelo AIP3-12-60C de American Isostatic Presses.

¹⁹ www.unionprocess.com/pdf/lab_attritors.pdf

²⁰ www.retsch.com/dltmp/www/36276-acdd0376481f/brochure_ball_mills_en.pdf

²¹ www.ahip.com/

4.4.7. Hornos de vacío y atmósfera controlada

Estos hornos serán necesarios en el Área APPM para llevar a cabo tratamientos en vacío y atmósfera controlada de los diferentes materiales que se pretenden fabricar.

4.4.8. Máquina de *swaging*

En el Área APPM de *TechnoFusión* será necesaria una máquina de *swaging* para tratamiento de aceros y aleaciones en frío. De los distintos modelos ofertados por las casas comerciales, la opción más satisfactoria para *TechnoFusión* sería el equipo FELSS FR 25V (Figura 4.11) de la casa comercial FELLS²² dado que posee un molde de diámetro 1 – 12 mm.



Figura 4.11. Máquina de swaging modelo FELSS FR 25V.

4.4.9. Máquina para procesamiento de metales por deformación plástica severa

La deformación plástica severa (*Severe Plastic Deformation*, SPD) permite refinar el grano de las aleaciones metálicas hasta tamaños de grano submicrométricos e incluso nanométricos. Se ha demostrado que este refinamiento de grano induce una mejora notable en las características mecánicas y tribológicas de los metales. En este sentido sería muy interesante dotar al Área APPM de *TechnoFusión* con una máquina prototipo de Extrusión Angular de Sección Constante (*Equal Channel Angular Pressing*, ECAP) con capacidad para deformar material masivo. Esta máquina se diseñaría en base a los ensayos que se actualmente se realizan para estudiar la

²² www.felss.de

capacidad de la técnica para inducir nanoestructuras, refinamiento de grano y mejora de las propiedades mecánicas en algunos aceros de baja activación inducida.

4.4.10. Equipos para el análisis y control de los materiales fabricados

La composición química y estructura de los materiales fabricados así como la de los materiales de partida, han de estar bien caracterizados para establecer la eficacia del control de los procesos de fabricación y tratamiento de los materiales. En este sentido, el Área APPM de *TechnoFusión* deberá contar con sistemas de análisis de impurezas gaseosas (O, N, C y S), así como con equipos para la caracterización estructural, metalográfica y mecánica rutinaria de los materiales. Se propone el siguiente equipamiento de análisis y control:

- Analizador de O y N tipo LECO TC-400
- Analizador de C y S tipo LECO CS-230
- Difractómetro de Rayos X
- Microscopio de barrido con haz de iones
- Máquinas de ensayos mecánicos macroscópicos
- Microdurómetro
- Microscopio metalográfico
- Ultrapicnómetro de He

Adicionalmente, se necesitará contar con un mínimo de equipos e instrumentos para el corte y preparación de los materiales como: balanzas de precisión, cámara de guantes para manipulación de polvos, cortadora rápida, cortadora de precisión, pulidoras de varios tipos, abrasión por chorro de arena, grupo de soldadura, soplete de acetileno y herramientas diversas y banco de trabajo.

4.5. Capacidad experimental

Las actividades experimentales que se llevarán a cabo en el Área APPM de *TechnoFusión* se centrarán principalmente en la fabricación a escala semiindustrial de:

- Aceros, aleaciones de Fe-Cr y de W, ODS y no-ODS, por aleado mecánico y consolidación mediante HIP o SPS.
- Aceros y aleaciones de baja activación inducida y resistentes al daño de irradiación mediante VIM.

- Materiales funcionales y cerámicos producidos por las técnicas de HIP y SPS.
- Recubrimientos mediante la tecnología de VPS, y experimentos de unión entre metales diferentes y metal-cerámica.

Adicionalmente, los equipos con los que se contará permitirán llevar a cabo otra serie de actividades de fabricación y/o procesamiento como, por ejemplo:

- La producción de materiales en cantidad significativa para su adecuada caracterización por diferentes grupos de investigación implicados en el estudio de materiales para fusión.
- La fabricación y procesamiento de los materiales requeridos por los usuarios de *TechnoFusión*.
- La fabricación de materiales estructurales, aceros, aleaciones modelo Fe-Cr, V-Ti, etc., con los adecuados controles de composición, en cantidades comprendidas entre 2 y 50 kg por fundición mediante la técnica VIM.
- El procesamiento de materiales mediante tratamientos termo-mecánicos y ECAP para mejorar sus características.
- La fabricación de recubrimientos de W, carburos y cerámicas multifuncionales mediante la técnica de VPS.

4.6. Requerimientos de espacios físicos, instalaciones y seguridad

(I) Espacios físicos e instalaciones requeridas

El Área APPM de *TechnoFusión* requerirá, al menos, de los siguientes espacios físicos:

- 1 nave de 400 m² para albergar: los hornos VIM, SPS y HIP y el sistema de VPS, las máquinas de swaging y ECAP, los molinos en un habitáculo insonorizado y una vitrina con campana extractora para la mezcla y manipulación de polvos. El suelo de esta nave deberá soportar cargas de uso de hasta 500 kg/m² en la localización del SPS, o de hasta 360 kg/m² en el caso del VIM. Esta nave deberá disponer además de una grúa puente.
- 1 sala de 40 m² para instalar las máquinas de ensayos mecánicos.
- 1 sala de 30 m² para albergar los equipamientos de análisis y control de los materiales.

- 1 sala de 30 m² para la instalación de los instrumentos y máquinas auxiliares.
- 1 sala de 30 m² para la instalación del microcopio de barrido con haz de iones, y el difractor de rayos X.
- 1 sala de 20 m² para taller y herramientas.
- 1 almacén de 30 m² con dos compartimentos separados.

En cuanto a las instalaciones requeridas, se necesitará:

(a) Instalación eléctrica:

- En la nave, al menos 4 líneas trifásicas independientes: 2 líneas de 3x400 V±10 %, para ~ 300 kVA, y la otras dos de 3x400 V±10 %, para ~200 kVA.
- 4 líneas trifásicas adicionales para 15 kVA en la nave.
- 2 líneas trifásicas para 10 kVA en la habitación del microcopio de barrido y difractor de rayos X.
- 2 líneas trifásicas para 15 kVA en la sala que contenga las máquinas de ensayos mecánicos.
- 1 línea trifásica para 20 kVA en la sala de análisis y control.
- Instalación bifásica convencional para soportar 20 kW en la nave, taller y resto de salas y/o almacenes.

(b) Instalación de agua:

- Superior a 300 L/min (4 bar) cuando operen simultáneamente el VIM y el SPS.
- Torre de refrigeración y grupo de presión para circuito cerrado de agua.

(c) Instalación de aire comprimido y suministro de gases:

La nave donde se instalen los hornos, las dos salas con los instrumentos de análisis y máquinas auxiliares, y el taller deben disponer de salidas de aire comprimido a 6 bar como mínimo. Además, se necesitará una instalación para suministro de, al menos, gases de N₂, O₂, y Ar. También se necesitará una instalación adecuada para el uso ocasional de gases peligrosos como el H₂.

(II) Requerimientos de seguridad

Para la manipulación segura de los polvos metálicos y cerámicos se necesitará la instalación de una vitrina con campana extractora con los filtros adecuados.

Se requerirá la instalación general de un sistema de detección de desplazamiento de oxígeno. Además, en los lugares donde se instalen equipos que puedan usar H_2 se ubicará un sistema de detección de fugas para este gas. Será necesaria también una vitrina estanca con sistema de detección de H_2 con alarma y extracción de aire para contener el molino de tipo attritor donde se realizará experimentos de aleado mecánico en H_2 .

Para alguno de los equipos como, por ejemplo, los molinos atritores y planetarios, será necesario tomar una serie de medidas de seguridad como: insonorización de la sala (nivel de ruido ≈ 85 dB por equipo), instalación de soportes antivibratorios dado las altas velocidades de rotación que pueden llegar a alcanzar (hasta 500 rpm), etc.

No se contempla trabajar con material radiactivo ni con fuentes de radiación por lo que no se requerirán medidas de seguridad radiológica.