

LA PROBLEMÁTICA DE LA VASIJA EN LOS ACCIDENTES SEVEROS. PROYECTOS INTERNACIONALES DE INVESTIGACIÓN

J. M^a. FIGUERAS

El artículo describe los aspectos más relevantes de los programas y proyectos de investigación más importantes, sobre el comportamiento de la vasija frente a los accidentes severos con fusión parcial o total del núcleo, que se han realizado desde hace unos veinte años y de los que están en curso actualmente, por parte de países y de organizaciones internacionales de la comunidad nuclear, presentando los aspectos técnicos más destacados, especialmente los resultados obtenidos, así como los aspectos organizativos y financieros asociados.

Se concluye que, gracias al esfuerzo conjunto de esa comunidad internacional nuclear, en la que España a través de sus instituciones y empresas ha estado presente, se ha conseguido tener un conocimiento razonable teórico y experimental del comportamiento de la vasija en caso de producirse un accidente severo, si bien todavía quedan aspectos no totalmente resueltos que son los que dan lugar a que ciertos proyectos estén todavía en marcha y a que se propongan otros nuevos en la materia.

ANTECEDENTES

La investigación en seguridad nuclear ha experimentado sendos cambios radicales a partir de los dos accidentes graves ocurridos en la industria, el de TMI 2 en 1979 y el de Tchernobil 4 en 1986, poniéndose de manifiesto la necesidad de conocer con detalle los procesos que se producen dentro y fuera de la vasija durante los denominados *accidentes severos* o accidentes fuera de la base de diseño.

Gran parte de la investigación realizada durante los últimos veinte años por la comunidad científica nuclear internacional, bien por los organismos reguladores, bien por los grupos de propietarios de centrales nucleares, los tecnólogos, los centros de investigación o las universidades, ha sido promovida y llevada a cabo con los objetivos básicos de conocer con detalle los fenómenos que se pueden producir durante un *accidente severo* y de desarrollar herramientas de cálculo y métodos para prevenir la ocurrencia de los mismos o de paliar los efectos, en caso de que sucedan.

Uno de los componentes que han centrado la atención de estos estudios y análisis de investigación, tanto teóricos como experimentales, es la *vasija*, dado el papel esencial que juega como barrera de seguridad en caso de accidente. La fenomenología y los efectos del *accidente severo* en la vasija exige conocer detalladamente su comportamiento frente a cambios bruscos y elevados de presiones y temperaturas y a las interacciones físico-químicas con la resultante de un núcleo parcial o totalmente degradado.

El comportamiento de las vasijas ha sido totalmente distinto en los dos accidentes mencionados. Mientras que en TMI 2 la vasija resistió los fuertes transitorios de presión y temperatura a los que estuvo sometida, además de no fallar catastróficamente ante las cargas térmicas resultantes de la fusión parcial del núcleo, la situación en Tchernobil 4 fue radicalmente diferente, liberándose gran parte del contenido del núcleo al exterior. En consecuencia, las investigaciones debían estudiar los "cómo" y los "porqué" una vasija es capaz de resistir o no tales agresiones

resultantes de un *accidente severo*, pues de ello dependería que el fenómeno progresara o se "detuviera" en ese momento.

Por ello, los proyectos o programas de investigación han tendido hacia dos tipos de experimentaciones, que se pueden considerar complementarias: las de *modelo completo* o a gran escala, que pretenden estudiar los fenómenos físicos y químicos que se dan en el interior de la vasija, y las de *modelo reducido* o a media y pequeña escala, en las que tras aislar uno de los varios fenómenos que se producen, se realiza su estudio detallado.

PROYECTOS INTERNACIONALES DE INVESTIGACIÓN

Tales proyectos o programas de investigación son per se altamente complicados, de larga duración y, sobre todo, muy costosos. Ello ha supuesto que, salvo casos excepcionales de colaboración bilateral o de unos pocos países, a propuesta de alguno de ellos (p.ej)^o. USA, Francia, Alemania y/o

Japón), la inmensa mayoría de proyectos de investigación sobre el comportamiento de la vasija frente a accidentes severos son de tipo internacional, con participación de un gran número de países, bien a través de acuerdos multilaterales a partir de la invitación de algún país o bien por coordinación de las organizaciones internacionales como OIEA, OCDE o las Comunidades Europeas.

España, gracias a su pertenencia a los organismos internacionales y a los acuerdos bilaterales que mantiene con gran parte de los países líderes en el campo nuclear, ha procurado ser, y de hecho está siendo, parte de los proyectos y programas más importantes que se han propuesto en la comunidad internacional al respecto, debido a los grandes retornos tecnológicos que se obtienen como resultado de la ejecución multilateral de estas investigaciones.

Algunos de estos programas han tenido como objeto principal conocer la fenomenología temporal acaecida en los accidentes citados, como es el caso de los promovidos tras el accidente de TMI 2 por la OCDE en 1980, "TMI 2 Accident Evaluation Program" y en 1988, "TMI Vessel Investigation Program", y los lanzados por la OIEA y por la OCDE en 1986 y 1988 tras el accidente de Tchernobil 4. Sin embargo, la mayoría de proyectos han sido propuestos y desarrollados a *posteriori* de dichos accidentes, y como se ha dicho, con alcance a gran escala (fenomenología completa) o a escala reducida (fenómenos aislados), en función de los recursos de que se dispusieran.

A continuación se hace una reseña, en absoluto exhaustiva, de los programas internacionales más importantes que se han realizado o están en curso de ejecución, en relación con la vasija y dentro del contexto de los accidentes severos, tanto de carácter reducido (por países individuales o por acuerdos bilaterales) como de gran participación (por acuerdos multilaterales), describiendo sus objetivos, sus hitos esenciales (participantes, duración, coste, etc.) y los retornos tecnológicos obtenidos o que se espera obtener.

TMI VESSEL INVESTIGATION PROGRAM (TMI-VIP)

Este ha sido uno de los primeros proyectos internacionales⁽¹⁾, de amplia participación y de tipo gran escala, que se han promovido, y surgió a raíz del proyecto previo, lanzado inicialmente por la USNRC y después por la OCDE-NEA, en 1980, "TMI 2 Accident

Evaluation Program", fundamentalmente por el escaso crédito que se otorgó al comportamiento de la vasija en el accidente, pues costaba justificar que la misma hubiese sido capaz de resistir los transitorios que se habían constatado al estudiar la secuencia temporal de aquel.

La USNRC, a principios de 1988 propuso al resto de países miembros del comité CSNI de la NEA (OCDE) la participación en un proyecto de investigación experimental cuyo objetivo básico era obtener y analizar muestras reales del fondo de la vasija de TMI 2, deducir de los ensayos el estado metalúrgico de la pared de la vasija y, finalmente, justificar porqué la misma no había fallado catastróficamente durante el accidente, como los cálculos teóricos habían predicho⁽²⁾.

El acuerdo internacional fue firmado por once países (USA, Bélgica, Alemania, Finlandia, Francia, Italia, Japón, España, Suecia, Suiza y Reino Unido) en junio de 1988. Este acuerdo, debido fundamentalmente a ciertas incertidumbres asociadas al estado de la vasija y a fenómenos no esperados inicialmente, tuvo que ser ampliado en octubre de 1990, incrementándose tanto en alcance como en duración y coste.

España, para poder participar, constituyó a su vez otro acuerdo de carácter nacional, firmado en 1988, en el que estaban representados UNESA, CSN, TECNATOM, ENSA y CIAT, aportando al proyecto internacional, el inicial y el ampliado, tanto financiación en dinero como en trabajos de ensayo y análisis de probetas de la vasija de TMI 2.

El proyecto completo se desarrolló entre 1989 y 1993, con un coste inicial de 7.075.000\$ y final de 9.018.000\$, de los que España, vía el acuerdo nacional, aportó 205.500\$ (180.500\$ en dinero y 25.000\$ en especie). La organización constó de dos comités internacionales de control, el de dirección y el técnico, a los que España perteneció, un agente principal (USNRC) y varios contratistas principales, entre ellos los Laboratorios Nacionales de Argonne, ANL, y de Idaho, INEL.

En enero 1990 se extrajeron 15 muestras prismáticas de sección triangular, 14 trozos de toberas de instrumentación intranuclear y 2 trozos de tubo-guía, así como muestras de residuos del fondo (muestras *companion* de *debris*). Los tres primeros tipos, tras ser descontaminados, fueron ensayados en USA, Bélgica, Alemania, Finlandia, Francia, Italia, España y Reino Unido durante 1991 y 1992.

A España se le asignaron probetas procedentes de 3 muestras prismáti-

cas, las cuales fueron ensayadas a tracción, a resistencia Charpy y a fluencia térmica y analizadas metalográficamente por TECNATOM, ENSA y CIAT. Ello supuso el desarrollo de equipos de ensayo con los que se tenía poca experiencia, ya que las probetas debían ser ensayadas a altas temperaturas (más de 1.000° C), lo cual se consiguió con todo éxito.

Como resultados fundamentales, tras el análisis integrado de los ensayos de probetas metalúrgicas, de toberas y de tubos-guía, de las muestras *companion* y de los cálculos empíricos asociados, destacan los siguientes⁽³⁾:

a) se detectaron varias grietas, que atravesaban el plaqueado (*cladding*) de material SS 308 y espesor medio 5 mm., y penetraban unos 2 a 3 mm. en el material base de SA 533 B, con longitudes entre 1,5 y 8 pulgadas; estas grietas estaban rellenas de residuos (*debris*) de materiales refundidos y solidificados del núcleo (UO₂, Zircaloy, Ag, In, Cd, etc.).

b) en cuanto a la estimación de temperaturas alcanzadas en el metal del fondo de la vasija, en general se superó la temperatura de transformación ferrita-austenita, de 727° C, y en 4 de las 15 muestras extraídas, localizadas en una cierta zona situada en el cuadrante sudoeste y que se denominó "punto caliente", se alcanzaron valores entre 1.000 y 1.100° C.

c) En la superficie interior del fondo de la vasija, en contacto con los *debris*, las temperaturas del metal, durante un periodo de tiempo en el entorno de los 30 minutos, oscilaron entre los 1.040 y los 1.150° C según las zonas. Estos valores se redujeron en unos 100° C, a una profundidad de 50 mm. dentro del metal.

d) No obstante, estas estimaciones no fueron compartidas por todos los participantes, en especial Japón que justificaba por cálculos propios que los valores máximos en el "punto caliente" eran de 1.300 a 1.400° C. Ello condujo a un estudio específico del "punto caliente", puesto que esas diferencias de estimación entre 200 y 300° C sólo podían provenir de una diferente interpretación de los mecanismos ocurridos en el fondo de la vasija a la asumida inicialmente.

e) Los *debris* analizados, procedentes de los restos de la toberas y de los tubos-guía, se componían de eutécticos con un 70% de U, 14% de Zr, 14% de O y el resto trazas constituyentes del núcleo (Fe, Ni, Cr, Ag, In, Cd, ...). La porosidad era muy alta, entre 5 y 40%, y la densidad promediada era de 8,4 gr/cm³.

f) El calor residual de los *debris*, medido al cabo de 3 horas 45 min. y de 10 horas, era de 0,18 y 0,14 w/g U respectivamente, lo cual da una idea de que el "punto caliente" se mantuvo durante bastante tiempo.

g) Las temperaturas estimadas en los *debris*, independientemente de que estuvieran formados por una sola capa o por varias multicapas alternadas de *corium*, vapor de agua, etc., fueron del orden de los 2.000 a 3.000° C, durante la fase más crítica del accidente (entre las 2 y las 4 horas, desde el inicio), por lo que da idea de la gran fuente de calor que existió dentro de la vasija: unas 18 a 20 Tm. de materiales fundidos, con temperaturas en su interior entre 2.000 y 3.000° C, mantenidas durante unas 2 a 4 horas.

Tras estos resultados experimentales, el proyecto continuó con una serie de cálculos tensionales mediante códigos estructurales de elementos finitos tipo ABAQUS y ADINA y de simulaciones de comportamiento con árboles de fallo, para modelar las posibles formas de fallo del fondo de la vasija:

- fallo global del fondo semiesférico por fluencia térmica.
- fallo local del fondo, en la zona del "punto caliente" con mecanismo de jet impingement.
- fallo local de una tobera, por sobrecalentamiento.
- fallo local de una tobera, por fluencia (eyección).

Los resultados de tales análisis y simulaciones dieron como consecuencia los siguientes, que se consideran como conclusiones definitivas del Programa TMI-VIP⁽³⁾:

1) En la región del fondo de la vasija, denominada "punto caliente", de aproximadamente 1 m. de diámetro, el material base de acero ferrítico alcanzó los 1.100° C, en la zona de interfase con el plaqueado de acero inoxidable, y permaneció a esa temperatura durante unos 30 minutos hasta que comenzó a enfriarse. A profundidades de 50 mm. en el espesor de la pared del fondo se alcanzaron temperaturas unos 100° C inferiores a las de la cara interna. Fuera de la zona del "punto caliente" no se superó la temperatura de transformación austenítica, 727° C.

2) Aunque no se haya podido determinar un escenario definitivo que describa con detalle la relocalización del núcleo fundido y la formación del "punto caliente", hay evidencias suficientes que indican que el fondo de la vasija se cubrió con una capa aislante

de *debris* conteniendo materiales metálicos y cerámicos. El "punto caliente" se formó allí donde la capa tenía espesor insuficiente para aislar la pared del flujo de *corium* fundido.

3) Los márgenes de fallo asociados a los mecanismos de rotura de la soldadura vasija/tobera de instrumentación y del tubo-guía, ex *vasija*, son suficientes como para poder descartarlos.

4) Los resultados de los análisis indican que un efecto local, como el del "punto caliente", puede reducir significativamente el tiempo de fallo global de una vasija por rotura debida a fluencia térmica. No obstante, para las presiones y temperaturas alcanzadas durante el accidente de TMI 2, es improbable que se produzca el fallo de una vasija. De manera general, se puede afirmar que, para condiciones realmente altas de presión y temperatura dentro de la vasija, el fallo global por fluencia térmica no puede descartarse.

5) De no existir mecanismos de enfriamiento del *corium* y del resto de la pared de la vasija, los cálculos basados en las distribuciones de temperatura en el fondo indican que se hubiera producido el fallo catastrófico de la vasija cuando el sistema primario se represurizó, por actuación de los operadores, a los 300 minutos del inicio del suceso.

6) De los resultados de este proyecto se deduce que para prevenir un accidente severo, en el que se produzca una relocalización del núcleo, es imprescindible el enfriamiento del fondo de la vasija antes de cualquier intento de recuperación de las condiciones de presión de la misma.

7) Finalmente, el proyecto ha tenido especial importancia por su aportación al conocimiento de las propiedades de los aceros y otros materiales de vasija a altas temperaturas, superiores a los 750° C. En particular, para el consorcio español que participó, supuso un reto el conseguir, con éxito, la realización de ensayos de fluencia térmica y de tracción a temperaturas de más de 1.000° C.

El hecho de que al final surgieran incertidumbres como las planteadas en las conclusiones del proyecto TMI-VIP, fue elemento suficiente como para que por varios países y organizaciones de la comunidad internacional se propusieran proyectos continuadores que, de modo parcial o global, cerraran tales dudas sobre la fenomenología involucrada en el comportamiento de la vasija de TMI 2 y explicaran las diferencias encontradas entre las predicciones teóricas de fallo y la realidad del accidente.

De una parte, era necesario analizar con mayor detalle el comportamiento de los *debris* y de la "piscina" de *corium* formada encima de la pared del fondo de la vasija. A esto tratan de responder proyectos tales como RASPLAV I y II (OCDE), FARO (UE, Ispra), COPO (Finlandia), BALI (Francia) y otros.

De otra, no había quedado suficientemente justificado que la pared del fondo no fallara catastróficamente, y por tanto el comportamiento estructural y térmico estaba a falta de estudio más detallado. A este segundo aspecto responden proyectos como LHF I (USA) y LHF II (OCDE), así como RUPATHER y KRAKATOA (Francia), CORVIS (Suiza), SONATA IV (Corea) y otros.

RASPLAV I Y II

A principios de 1994, el Centro de Investigación Kurchatov de Moscú propuso a los órganos rectores de la NEA (OCDE) participar en la investigación⁽⁴⁾ que ya se estaba iniciando en Rusia sobre aspectos tales como: (1) la cuantificación del calor recibido por la pared de la vasija durante el proceso de formación de la "piscina" de materiales fundidos en un accidente severo, (2) la posibilidad de refrigerar desde el exterior de la vasija y disminuir, por tanto, dicho flujo calorífico, y (3) el análisis de las interacciones físico-químicas producidas entre el acero de la vasija y el *corium* real (ya que, hasta entonces, el *corium* se había simulado con materiales no radiactivos o con fuentes térmicas).

Este también ha sido un proyecto internacional⁽⁵⁾, de amplia participación y de tipo gran escala, surgido a raíz del proyecto previo de la OCDE-NEA ya comentado, TMI-VIP, a la vista de las incertidumbres finales del mismo con respecto a los *debris* y materiales formados a partir de la degradación del núcleo. Además es el primer proyecto de la OCDE-NEA llevado a cabo en un país, Rusia, no-miembro de la misma.

El acuerdo internacional fue firmado por catorce países (USA, Bélgica, Canadá, Alemania, Finlandia, Francia, Italia, Japón, Corea, Holanda, España, Suecia, Suiza y Reino Unido), además de Rusia, en julio de 1994⁽⁶⁾, y fue posteriormente ratificado también por Chequia y Hungría. Este acuerdo, debido fundamentalmente a la necesidad de ampliar el conocimiento adquirido en la primera fase, ha sido complementado recientemente en abril de 1998, mediante una fase II con nuevo alcance, duración y coste.

España, participó en la primera fase representada por el CSN, y para la segunda fase se ha constituido un acuerdo de carácter nacional, firmado en 1998, en el que están representados CSN, UNESA y la UPM, aportando al proyecto internacional, el inicial y el posterior, esencialmente financiación en dinero.

La primera fase del proyecto se desarrolló entre julio de 1994 y junio de 1997, con un coste final de 6.900.000 \$, de los que España, vía el CSN, único participante, aportó 115.500 \$. La segunda fase de RASPLAV, se desarrolla actualmente, entre julio de 1997 y mayo de 2000, y su coste es de 4.700.000 \$, de los que España aporta, a través del acuerdo PCI entre UNESA y CSN, unos 80.000 \$.

La organización, similar en ambas fases, consta de dos comités internacionales de control, el de dirección y el técnico, a los que España pertenece, un agente principal (Instituto Kurchatov) y varios colaboradores rusos en la investigación, entre ellos IBRAE RAN, NPO Elektrotherm y NPO ThermIKS.

RASPLAV, fase I.

En la primera parte de este vasto programa, se determinó desde el inicio que era necesario seguir líneas paralelas, de estudio experimental en los modelos a escala propuestos por el Instituto Kurchatov, y de análisis teóricos termohidráulicos complementarios.

En la primera línea, la experimental, Rusia propuso varios modelos, apropiados para cada uno de los tres objetivos antes citados. Así, para el primer objetivo, referente a cuantificar el calor recibido por la pared de la vasija durante el proceso de formación de la "piscina", el dispositivo era el propio RASPLAV, consistente en una geometría de rodaja semiesférica de vasija, rellena de material tipo *corium*, con propiedades preestablecidas, que al fundir produjeran las condiciones de una "piscina" de materiales de núcleo fundidos.

El segundo objetivo, posibilidad de refrigerar desde el exterior de la vasija y disminuir el flujo calorífico, también se cubría con esta instalación, mediante aplicación de refrigeración externa.

Finalmente, para el tercer objetivo, relativo al análisis de las interacciones físico-químicas producidas entre el acero de la vasija y el *corium*, se diseñaron dos instalaciones complementarias, la TULPAN, consistente en un horno de calentamiento por inducción para estudio de materiales fundidos

con números de Rayleigh hasta 10^{12} , y otra, la RASPLAV-Salt, con sales fundidas, para análisis de comportamiento con números de Rayleigh mayores de 10^{14} .

Una descripción muy detallada de todos los experimentos realizados dentro del programa RASPLAV I se puede encontrar en las referencias⁽⁴⁾ y ⁽⁵⁾, esta última presentada por el propio director del proyecto, Sr. V. Asmolov. Baste aquí recordar un resumen de los mismos.

Previamente a los dos grandes experimentos realizados en la instalación RASPLAV, se llevaron a cabo una serie de experiencias a pequeña escala, las denominadas RASPLAV-LIQ, RASPLAV-AW-2,5 y RASPLAV-AD-2,5, en las que se determinaron las propiedades termofísicas y químicas de diferentes composiciones de *corium*, por primera vez a tan altas temperaturas, y las geometrías más convenientes. Se probaron los tipos C-22, C-50 y C-100 variando el contenido de UO_2 , entre 78,0 y 81,5%, y de ZrO_2 , entre 5 y 22%. A efectos comparativos, conviene recordar que el *corium* analizado en el proyecto TMI-VIP se componía de 78% de UO_2 y 17% de ZrO_2 (parecido al C-100). Las masas de *corium* usadas fueron, respectivamente, de 5, 12 y 40 kg., y las temperaturas a las que llegó el material fundido estaban entre 2.450 y 3.000 °C, similares a las de TMI 2.

Una vez caracterizados los parámetros fundamentales del experimento, se realizó el primer gran ensayo, RASPLAV-AW-200-1, en octubre de 1996. En este ensayo se utilizó la geometría de rodaja, de dimensiones 40 cm. de radio y 11,6 cm. de espesor, el material típico de vasijas rusas, 200 kg. de ladrillos de *corium* C-22 y una capa externa de 41 kg. de *corium* C-100 poroso, y se dispuso un sistema de refrigeración externa para producir condiciones lo más adiabáticas posibles. El conjunto se sometió a un aporte calorífico vía un inductor electromagnético de 300 kw y 1,8 kHz.

En el experimento AW-200-1, se consiguió mantener un flujo térmico de unos 130 kw/m², durante más de 2 horas hasta convección natural, alcanzando temperaturas en el crisol de 2.700 °C, el cual se fundió en un 70% del volumen. Se observó una pequeña cavidad en la parte superior y se consiguió una estratificación axial casi completa, en dos capas, entre los materiales líquidos de diferentes densidades, sin afectarse el acero de la pared.

Con cierto retraso, se llevó a cabo el segundo de los grandes experimentos de la serie, RASPLAV-AW-200-2, en el que se utilizó la misma geometría de

rodaja, el mismo material de vasija, otros 200 kg. de ladrillos de *corium* C-22 y una capa externa de 7,5 kg. de *corium* C-100 poroso, y también se dispuso un sistema de refrigeración externa para producir condiciones lo más adiabáticas posibles. El conjunto se sometió a un aporte calorífico vía el inductor electromagnético, que fue ligeramente modificado respecto del primer experimento para mejorar la isotropía del campo térmico.

En este segundo gran experimento⁽⁶⁾,⁽⁷⁾, el flujo térmico aumentó considerablemente hasta los 250 kw/m² y se mantuvo durante casi 3 horas, fundiéndose más del 70% en volumen, si bien la estratificación fue menos definida y, a cambio, se detectó una interacción entre el *corium* fundido y la pared de acero, y la cavidad producida, consecuentemente, fue de mayores dimensiones. Se alcanzaron temperaturas en crisol de 2.620 °C.

En cuanto a los experimentos en la instalación TULPAN, además de los previos para caracterizar el tipo de *corium* a fundir, se realizaron cuatro ensayos, T1 a T4, con diferentes composiciones de *coriums* C-22 y C-100, y el objeto fue tanto analizar el ataque a la pared de la vasija, cuando no hay refrigeración externa, como estudiar la estratificación de los metales fundidos. Los resultados fueron parecidos a los obtenidos en la serie RASPLAV-AW-200.

Respecto de los experimentos en RASPLAV-Salt se han llevado a cabo seis series, S0 a S5, de ensayos, con diferentes composiciones de sales y de regímenes termohidráulicos. Como se ha comentado antes, dado que dentro de un reactor real este régimen se caracteriza por números de Rayleigh (Ra) entre 10^{14} y 10^{15} , números de Prandtl (Pr) cercanos a la unidad y números de Nusselt (Nu) entre 100 y 130, y en los experimentos es difícil superar números Ra de 10^{12} y Nu de 100, se decidió usar una instalación complementaria para estudiar regímenes desde conducción pura hasta turbulencia máxima (Ra entre 10^2 y 10^{15}). Resultantes principales fueron que la existencia o no de costras de debris resolidificados no afectan al flujo calorífico, si este es de tipo volumétrico, y que para flujos caloríficos no volumétricos existe una pequeña diferencia del orden del 10%, si existen tales costras.

En cuanto a la segunda línea del proyecto, los análisis teóricos complementarios, se han desarrollado y validado códigos de cálculo termohidráulicos en 2 y 3 dimensiones, los denominados CONV-2D y 3D, que analizan procesos de transferencia de masa y de calor,

en convección y en turbulencia a altos números Ra, en fluidos viscosos en dos fases, mediante las conocidas ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible no estacionario.

Como resumen final de conclusiones de esta primera fase del proyecto RASPLAV, se obtienen las siguientes:

1) Se han podido cuantificar, por primera vez, una serie de propiedades del *corium*, tales como viscosidad, conductividad térmica, punto de fusión, en un rango de temperaturas que llegan hasta casi los 3.000° C.

2) Se han llevado a cabo dos grandes experimentos, en la serie RASPLAV-AW-200, obteniendo importantes datos sobre cómo se producen las "piscinas" de *corium* fundido, a altas temperaturas del orden de los 2.500° C, sobre la estratificación en capas entre los materiales líquidos de diferentes densidades y sobre la distribución del U y del Zr en aquellas.

3) Se han realizado experiencias complementarias, en las series TULPAN y RASPLAV-Salt, mediante las cuales se ha conocido el comportamiento termohidráulico del *corium* fundido y se ha podido correlacionar con el de los baños de sales fundidas. Todo ello ha servido para desarrollar y validar códigos de cálculo termohidráulicos en 2 y 3 dimensiones, en condiciones similares a las que se darían en el interior de la vasija en caso de producirse un accidente severo con fusión parcial o total del núcleo y producción de *corium*.

4) Los nuevos fenómenos descubiertos, específicos del comportamiento del *corium* fundido y parcialmente resolidificado, permiten formular una serie de aspectos todavía no resueltos, como profundizar en el estudio de los fenómenos termohidráulicos de la "piscina" de *corium*, completar las bases de datos de propiedades termofísicas del *corium*, y perfeccionar los códigos de cálculo para incluir modelos conjugados de transferencia de masa y de calor, que dan lugar a solicitar una ampliación del proyecto.

RASPLAV, fase II.

Los interrogantes y aspectos pendientes dejados en la primera fase se han traducido en el desarrollo de esta segunda, la cual se inició a mediados de 1997 y continúa hasta junio de 2000. El objetivo básico en este segundo periodo es el citado en la conclusión cuarta del primero, y se resume en ampliar la investigación de los fenómenos físicos y de las interacciones químicas. Que tienen lugar en una "pisci-

na" de *corium*, en fase convectiva, para reducir las incertidumbres asociadas.

De modo específico, se pretende obtener datos experimentales, mediante tres nuevos ensayos de gran tamaño tipo RASPLAV-AW-200, para confirmar ese régimen convectivo, así como continuar con los experimentos en RASPLAV-Salt para llegar a valores Ra hasta 10^6 , y seguir analizando la formación de costras y de capas de estratificación.

Otro conjunto de trabajos que se pretende acometer en esta segunda fase es el referente al efecto de los aditivos en el comportamiento químico del *corium*, ya que la presencia de materiales tales como C, Ag, In, Cd, de las barras de control y de productos de fisión de baja volatilidad, como BaO, CeO₂ o La₂O₃, pueden modificar la química de los eutécticos formados en el *corium*.

Recientemente se ha realizado un nuevo experimento en la instalación RASPLAV a gran escala con 200 Kg. de *corium*, AW-200-3. Este ensayo se realizó con mezcla tipo C-100. Los resultados obtenidos no han mostrado estratificación apreciable. Se ha comenzado ya el trabajo de examen metalográfico del lingote obtenido y de los materiales estructurales de este tercer experimento.

Actualmente se han establecido los requisitos técnicos para el cuarto experimento, AW-200-4, con 200 Kg. de *corium*, segundo de la fase RASPLAV II, que posiblemente será el último de este tipo ya que se está considerando que los experimentos a pequeña escala pueden aportar mayor información sobre el problema de estratificación. Este cuarto experimento partiría de una composición de *corium* C-22 con un contenido en C muy bajo, y con condiciones de contorno isotermas en la parte superior, más próximas a la realidad del reactor que las condiciones adiabáticas utilizadas anteriormente.

Se ha realizado un experimento sobre estratificación en la instalación TULPAN con *corium* C-100, el T-5. Se realizará próximamente el último experimento de esta serie, el T-6, que se considera interesante porque ofrecerá datos sobre interacción química entre el *corium* resolidificado y la pared de acero de la vasija.

Después del accidente sufrido en la instalación RASPLAV-Salt, esta se ha reconstruido, y se prevé realizar una última serie de experimentos en los que se alcanzarán valores Pr de 1 y Ra de 10^6 , que son valores prototípicos del reactor. Si se liberan nuevos fondos en el Proyecto, como resultado de la anulación del último experimento RAS-

PLAV a gran escala previsto, se realizarán nuevos experimentos con sal fundida.

LOWER HEAD FAILURE (LHF) I Y II

Al bloque de proyectos que intentan analizar con mayor detalle el comportamiento termo-estructural de la vasija pertenece la serie LHF, la primera acometida en solitario por la USNRC en colaboración con el Laboratorio Nacional de Sandia (SNL), y la segunda ofrecida recientemente por la USNRC al grupo de países pertenecientes al comité CSNI de la NEA.

LHF I

El programa se ha desarrollado íntegramente en USA, por la USNRC y el SNL, entre 1995 y 1997, y ha consistido en una serie de ocho pruebas de fallo por fluencia de fondos de vasija tipo PWR a escala 1/5, de material SA 533 B1, sometidas a diferentes estados de presión y temperatura.⁽⁶⁾

Se construyeron 8 maquetas conteniendo, cada una de ellas, un fondo semiesférico (diámetro interno 91 cm. y espesor 30 mm.) y un trozo de cilindro de 30 cm. de altura. Los ensayos consistieron en calentar por dentro, con un sistema de resistencias eléctricas, hasta alcanzar los 750° C en la pared metálica, a la vez que el conjunto se sometía a una presión de 1.460 psi., y mantenerlo así hasta que el fondo fallara catastróficamente.

Los ensayos, realizados 4 en 1996 y 4 en 1997, eran del siguiente tipo y proporcionaron los siguientes resultados:

LHF 1: flujo térmico uniforme de 30 kw/m², sin penetraciones; falló entre los 120 y 145 minutos, presentado una deformación radial del 33%.

LHF 2: flujo térmico uniforme con pico central tipo "punto caliente", sin penetraciones; falló a los 230 minutos, con una deformación radial del 34%.

LHF 3: flujo térmico uniforme con pico lateral tipo "punto caliente", sin penetraciones; falló a los 135 minutos.

LHF 4: flujo térmico uniforme, con penetraciones de Inconel; falló a los 165 minutos, por la zona de unión entre fondo y penetración.

LHF 5: flujo térmico uniforme con pico lateral, con penetraciones de Inconel; falló a los 250 minutos, de modo similar al anterior.

LHF 6: flujo térmico uniforme con pico lateral, con soldaduras hemisféricas.

LHF 7: flujo térmico central y presión variables, pasando de condiciones de alta presión y bajas temperaturas a condiciones opuestas, de modo que se excedieran los 727° C y los 10 Mpa.

LHF 8: flujo térmico variable y presión constante, con transitorio rápido de temperatura.

Las conclusiones principales que han derivado de este proyecto, en su fase I, se pueden resumir en:

1) El fallo final por fluencia se ha producido siempre en las zonas con faltas de uniformidad, bien en la micro o en la macroestructura del material, bien en los flujos térmicos aplicados.

2) Los fallos son siempre locales, con un tamaño de grieta sustancialmente menor que el tamaño de la zona calentada.

3) Las temperaturas alcanzadas en el momento del fallo han sido siempre del orden de los 750° C. Sin embargo, el fallo no siempre se ha producido a la misma presión, y en muchos casos esta ha sido inferior a los 10 Mpa.

4) Los modelos con penetraciones han fallado, en general, antes que los que no las tenían, y el fallo se ha producido siempre en la soldadura de unión entre la vasija y la penetración.

5) Las propiedades del material base del fondo de la vasija disminuyeron drásticamente; p. ej., la tensión de rotura varió desde los 550 Mpa. iniciales hasta los 130 Mpa. al final del ensayo.

LHF II

La fase II del programa LHF es una extensión de la fase I, y fue propuesta por la USNRC a los miembros del comité CSNI de la NEA-OCDE en 1997.⁽⁹⁾

El acuerdo internacional fue presentado en septiembre de 1998 y finalmente ratificado por ocho países (USA, Bélgica, Alemania, Finlandia, Francia, España, Suecia y Chequia) en noviembre de 1999. España participa representada por el CSN, aportando al proyecto internacional esencialmente financiación en dinero, ya que ciertos trabajos de análisis inicialmente previstos, en forma de un ISP, han sido cancelados.

El proyecto se desarrollará entre 1999 y 2001, con un coste final de 1.875.000 \$, de los que el CSN aporta 98.000 \$. La organización consta de un único comité internacional de dirección, al que España pertenece, un agente principal (USNRC) y un contratista principal, el Laboratorio Nacional de Sandía, SNL.

En esencia consiste en tres aspectos complementarios, que definen los objetivos del proyecto: (1) realizar cinco pruebas, similares en concepto a los

realizados en la fase I, aunque con ciertas características diferentes; (2) realizar ensayos mecánicos, 5 de tracción y 15 de fluencia térmica, a altas temperaturas, entre 925 y 1.300° K, para caracterizar los materiales una vez que hayan fallado en las pruebas precedentes, y (3) validar análisis estructurales mediante códigos de mecánica de fractura, tipo ABAQUS, contrastando los resultados de cálculo contra los experimentales.

En cuanto a las pruebas previstas, la primera de las cuales se llevará a cabo en febrero de 2000, se harán en maquetas a escala 1/5 similares a las de la fase I, con el mismo material SA 533 B1, con espesor de 70 mm., variaciones de presión entre 2 y 5 Mpa y gradientes térmicos en la pared del fondo de 200° K. El input térmico se dará con un inductor interno, de 750 kw y 1 KHz. Las características previstas son:

OLHF 1: flujo térmico uniforme, presión 5 Mpa.

OLHF 2: flujo térmico uniforme, presión 2 Mpa.

OLHF 3: flujo térmico uniforme, presión inicial 2 Mpa., con transitorio de represurización.

OLHF 4: flujo térmico uniforme, presión 2 Mpa, con penetraciones de Inconel.

OLHF 5: flujo térmico uniforme con pico lateral tipo "punto caliente", presión 2 Mpa., con transitorios de presión y temperatura (pendiente de definir).

Cuando haya terminado esta segunda fase, se estima que los resultados del programa LHF, en su conjunto, podrán ser incorporados a los módulos de fallo de vasija de los códigos de accidentes severos, tales como MELCOR, MAAP o RELAP/SCDAP.

OTROS PROYECTOS

Con un alcance menor y, sobre todo, con un entorno limitado a un solo país en la mayoría de casos, se pueden encontrar programas o proyectos de investigación sobre el fallo de la vasija en caso de accidente severo tales como el CORVIS del PSI suizo, el RUPATHER y el KRAKATO del IPSN francés o el conjunto SONATA IV del KAERI en Corea. De todos ellos, a modo de ejemplo, se describe el CORVIS como modelo de proyecto de investigación de alcance reducido y ámbito nacional.

CORVIS

El Paul Scherrer Institute suizo lanzó, en noviembre de 1991, un proyecto autóctono de investigación que se finalizó en mayo de 1996, que costó apro-

ximadamente 5.500.000 \$ y en el cual estuvieron presentes, como observadores, 7 países europeos (dado que fue parte del programa-marco de "Fisión" de las C.E.) además de USA, Japón, Corea y Rusia.⁽¹⁰⁾

El objetivo primario era realizar experiencias y cálculos referentes al fallo de la vasija de un reactor LWR durante un accidente severo con fusión del núcleo.

La parte experimental consistió en cinco series de ensayos, en un dispositivo que integraba, de un lado, un fondo de vasija, de diámetros entre 48 y 60 cm., altura 100 cm. y espesor de 10 mm, de material CS ST37 (posteriormente de acero al carbono 20MnMoNi55), rodeada por un contenedor de hormigón de 5 cm. de espesor, y de otro, un recipiente donde se hacía reaccionar una mezcla de termita, con polvo de Al y virutas de Fe, entre 200 y 1.000 kg. Al fundir esta mezcla, se vertía por gravedad en el fondo de vasija y se mantenía la temperatura del simulador de *corium* mediante un electrodo de grafito por el que pasaba una corriente entre 2 y 4 kA, con 130 kw. de potencia, durante unos 15 minutos.

Entre 1992 y 1996 se llegaron a realizar hasta 21 ensayos, del modo siguiente:

Series 00 y 01: 17 pruebas dedicadas a poner a punto la instalación (geometrías, cargas térmicas, electrodos, etc.). Varias veces los equipos se averiaron y dañaron hasta el punto de tener que rediseñarlos totalmente.

Serie 02/1: Una prueba, a escala grande, de un fondo sin penetraciones. El componente falló a los 210 segundos, en una zona lateral.

Serie 03/1, 2: Dos pruebas, a gran tamaño, de un fondo con una tobera de drenaje, típica de un reactor BWR de GE, en material CS CK60. En el primer caso, el fallo se produjo a los 7 segundos de penetrar el "*corium*" a unos 2.270° C en la tobera, fundiéndola y arrancándola. En el segundo caso, el "*corium*" entró también llenando hasta 7 m. de la tubería de drenaje, pero sin que fallara a pesar de las grandes deformaciones plásticas observadas.

Serie 04/1: Una prueba, a gran tamaño, de un fondo con cinco tubos-guía y tubos para incore monitors, típicos de un reactor PWR de W, en materiales Inconel 600 y SS 304. El "*corium*" entró, llenando hasta 4 m. de los tubos, pero no se produjo fallo catastrófico en ninguno.

De los resultados anteriores, puede deducirse que un programa de investigación del tipo del CORVIS es costoso,

(Pasa a la última página)