

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”**

**Metodologías de estimación de propiedades elastoplásticas
de componentes nucleares y selección de materiales para la
contención de núcleo fundido de centrales nucleares tipo
PHWR (*)**

por Patricio A. Piantanida

Director del Trabajo

**Mag. Juan Ramos E. Nervi
Ing. Ezequiel Fernandez**

Tutor: Ing. Rodrigo Taboada

(*) Trabajo de Seminario para optar al título de Ingeniero en Materiales

República Argentina

2020

Metodologías de estimación de propiedades elastoplásticas de componentes nucleares y selección de materiales para la contención de núcleo fundido de centrales nucleares tipo PHWR

Resumen

Este trabajo se ubica bajo el marco del proyecto de extensión de vida de la Central Nuclear Atucha I, llevado a cabo por la empresa Nucleoeléctrica Argentina S.A. Aquí se presenta el desarrollo de metodologías para la adquisición y estimación de propiedades de materiales (plásticas, elásticas y físicas) de la central, a partir de la comparación de estándares de fabricación actuales y de la época de diseño y construcción de la misma. Además, se realiza un análisis de selección de materiales para la construcción de una barrera anti-derrame de núcleo fundido, mediante el estudio de las exigencias y requerimientos desarrollados durante un accidente severo y las limitaciones impuestas por la remodelación de una central.

Palabras claves: Extensión de vida Central Nuclear Atucha I, propiedades propiedades elastoplásticas, accidente severo, barrera anti-derrame, core-catcher.

Methodologies for estimating the elastoplastic properties of nuclear components and selection of materials for the containment of molten core of PHWR nuclear power plants

Abstract

This work is carried out within the framework of the life extension project of the Atucha I Nuclear Power Plant, directed by Nucleoeléctrica Argentina S.A. The development of methodologies for the acquisition and estimation of material properties (plastic, elastic and physical) of the plant is presented, based on the comparison between current manufacturing standards and those emmitted during the design and construction of Atucha I. In addition, an analysis of a selection of materials is made for the construction of a molten core anti-spilling barrier, by studying the demands and requirements developed during a severe accident, as well as the limitations imposed by the refurbishment of a plant.

Key words: Life extension project Atucha I Nuclear Power Plant, elasto-plastic properties, severe accident, anti-spilling barrier, core-catcher.

Agradecimientos

Durante los últimos cuatro años varias personas y entidades me han acompañado durante este camino de aprendizaje.

Por un lado, quisiera agradecer a la Universidad Nacional de General San Martín, al Instituto Sabato y a la Comisión Nacional de Energía Atómica por proveerme de un espacio propicio para desarrollarme académica y profesionalmente; y a todo su personal por recibirme siempre con muy buena predisposición para resolver todos mis problemas e inquisiciones. Además, quisiera agradecer al grupo Techint por su apoyo, que me ha permitido concentrar mi esfuerzo en mis estudios.

A la empresa Nucleoeléctrica Argentina S.A. y su personal, en particular a mis directores, el Mag. Juan Ramos Nervi y el Ing. Ezequiel Fernandez, les agradezco hacerme sentir parte del grupo de trabajo y permitirme participar en sus proyectos; además de todo el conocimiento que me ayudaron a adquirir y siempre estar disponibles para responder a todas mis dudas. Así mismo, agradezco al Ing. Rodrigo Taboada del Centro Atómico Constituyentes, por hacerme sentir seguro de todas las decisiones tomadas durante este trabajo y proveer de su valiosa opinión.

Por otro lado, a mis compañeros del Sabato agradezco los buenos momentos compartidos, tanto dentro como fuera del aula.

Finalmente, a mi familia y amigos por su incondicional apoyo durante toda mi vida.

Contenido

I	Motivación	1
1.	Nucleoeléctrica Argentina S.A. y las centrales nucleares argentinas	1
2.	Proyecto de extensión de vida de CNAI	2
2.1.	Estimación de propiedades de materiales	2
2.2.	Mitigación de un accidente severo	3
II	Metodologías de estimación de propiedades de materiales de CNAI	4
1.	Desarrollo	4
1.1.	Bases y criterios para la estimación de propiedades plásticas	4
1.2.	Bases y criterios para la estimación de propiedades elásticas y físicas	9
2.	Resultados	10
2.1.	Metodología de estimación de propiedades plásticas	10
2.2.	Metodología de estimación de propiedades elásticas y físicas	15
3.	Aplicación de las metodologías	17
3.1.	Bulones de carcasa de bomba del circuito del moderador	17
3.1.1.	Estimación de propiedades plásticas	17
3.1.2.	Estimación de propiedades elásticas y físicas	19
3.2.	Carcasa espiral de bomba del circuito del moderador	20
3.2.1.	Estimación de propiedades plásticas	20
3.2.2.	Estimación de propiedades elásticas y físicas	21
3.3.	Tubo sin costura de intercambiador de calor	22
3.3.1.	Estimación de propiedades plásticas	22
3.3.2.	Estimación de propiedades elásticas y físicas	24
4.	Conclusiones	26
III	Mitigación de un accidente severo en CNAI	27
1.	Dispositivo contenedor de Núcleo Fundido	27
1.1.	Funcionamiento de un reactor tipo PHWR (CNAI)	27
1.2.	Accidente Severo	28
1.2.1.	Accidente severo “Ex-Vessel” en reactores PWR	29
1.2.2.	Accidente severo “Ex-Vessel” postulado en Atucha I	31
1.3.	Molten Corium Concrete Interaction (MCCI)	32
2.	Mitigación de las consecuencias de un accidente severo	34
2.1.	Core-catcher en reactores de agua liviana	34
2.2.	Dispositivo retenedor de núcleo fundido en reactor Atucha I	34
3.	Características topológicas de la barrera anti-derrame de núcleo fundido	36
3.1.	Diseño auxiliar de barrera anti-derrame de núcleo fundido	37

4. Estudio de desarrollo de accidente severo en CNAI	39
4.1. Estudio de MCCI en la contención de Atucha I	39
4.2. Criterio de falla de la contención	40
5. Materiales propuestos para la construcción de la barrera anti-derrame de núcleo fundido	42
5.1. Materiales de ultra alta temperatura	43
5.2. Materiales cerámicos refractarios	43
5.3. Materiales metálicos refractarios	44
5.4. Materiales acumuladores de energía térmica	45
6. Estudio de desempeño de materiales candidatos	46
7. Conclusiones	50
Anexo A. Programas desarrollados en lenguaje MATLAB	51
A.1. linfit4.m	51
A.2. selectfit4.m	51
Anexo B. Resultados del programa selectfit4.m sobre datos de metodología	52
Anexo C. Extrapolación de propiedades de materiales de barrera anti-derrame	53
C.1. Extrapolación de datos de material zirconia (ZrO_2)	53
C.2. Extrapolación de datos de material alúmina (Al_2O_3)	54
C.3. Extrapolación de datos de material renio (Re)	55
Referencias	56

MOTIVACIÓN

1. Nucleoeléctrica Argentina S.A. y las centrales nucleares argentinas

Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NA-SA) es una empresa dedicada a la generación de energía eléctrica, lo cual lleva a cabo mediante la operación de las centrales nucleares argentinas. Además de su operación, NA-SA está encargada del mantenimiento y actualización continua de estas centrales y participa en los proyectos de desarrollo nucleares del país.

NA-SA opera actualmente tres centrales nucleares, Atucha I, Atucha II y Embalse. La primera en ser construida ha sido la Central Nuclear Atucha I (CNAI), cuyo diseño desarrollado por la empresa alemana Siemens data de los años 1962-1968 y cuya construcción fue llevada a cabo entre los años 1968-1974 en la localidad de Lima, Buenos Aires. Esta central, mostrada en la **Fig. 1**, contiene un reactor del tipo Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) que utiliza uranio levemente enriquecido al 0.85 % como combustible y agua pesada como refrigerante y moderador. La central Atucha I, que actualmente provee 362 MWe, fue diseñada con un período de ciclo de vida de 32 años de plena potencia, los cuales fueron cumplidos en el año 2018. Es por esto que actualmente NA-SA se encuentra realizando las revalidaciones necesarias para poder seguir operando un segundo período, denominado segundo ciclo de operación, lo que le permitiría extender su vida útil unos 24,25 años [1].

En el mismo año de inicio de operación de CNAI, se comenzó la construcción de la segunda, central nombrada Embalse, ubicada en la costa sur del río Tercero, provincia de Córdoba. Esta central, cuya operación comercial comenzó en el año 1984, es de diseño canadiense y contiene un reactor del tipo CANDU que, al igual que CNAI, utiliza uranio natural y agua pesada como refrigerante y moderador. Para el año 2015, Embalse finalizó su primer ciclo de vida y luego de completar su proyecto de extensión de vida en el año 2019 ha comenzado su segundo ciclo de 30 años, proveyendo 683 MWe a la red eléctrica [2].

Aprovechando la experiencia operativa de Atucha I, en el año 1979 Argentina realizó un pedido a la empresa Siemens para la construcción de una segunda central del tipo PHWR, que pasó a nombrarse Atucha II. Su construcción comenzó en 1982 y luego de una paralización entre los años 1989 y 2006, se reanudó para concretarse en el 2014, año en el que se inició la conexión de esta central a la red nacional, proveyendo 745 MWe [1, 2].



Fig. 1: Central Nuclear Atucha I abicada en Lima, Buenos Aires.

2. Proyecto de extensión de vida de CNAI

Como se mencionó en la sección anterior, la central Atucha I ha finalizado su primer ciclo de vida en el año 2018. Desde entonces NA-SA ha gestionado su extensión de vida según los lineamientos establecidos por la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN). Estos lineamientos cubren los aspectos relacionados con la seguridad nuclear, entendiéndose por esto, la prevención de accidentes y la mitigación de las consecuencias de los mismos, cuyos efectos puedan ocasionar un daño a sistemas y personal de la planta o al ambiente.

2.1. Estimación de propiedades de materiales

Uno de los lineamientos a cumplir es la revalidación de los denominados Time Limited Ageing Analyses (TLAA), que son cálculos y análisis de la planta que consideran los efectos del envejecimiento. Estos implican supuestos de tiempo limitado definidos por el término operativo actual y generan conclusiones o proporcionan la base para conclusiones relacionadas con la capacidad de una estructura o componente para realizar sus funciones previstas [3]. A partir de la revalidación de los TLAAs se identifican aquellos sistemas y componentes que se encuentran comprometidos, debido a las condiciones a las que fueron sometidos durante el primer ciclo de vida de CNAI, y por lo tanto, deban ser controlados durante su operación posterior o ser reemplazados. De la misma manera, permiten identificar aquellos componentes cuya integridad estructural no se verá comprometida durante la futura operación, siendo posible extender su vida útil [4].

Una de las etapas de la evaluación de algunos TLAAs, como pueden ser la fatiga o creep, involucra el análisis del estado tensional al que cada componente se encuentra sometido, tanto durante condiciones normales de operación como durante los distintos transitorios que puedan suceder y que han sido identificados mediante estudios previos. De manera de reproducir estos estados tensionales, se proponen modelos termomecánicos junto con modelos de elementos finitos que involucren tanto la geometría de un componente como las características de los materiales que lo componen. Estas características se encuentran materializadas en las distintas propiedades del material que definen su comportamiento ante sollicitaciones termomecánicas. Es así, que para realizar estos cálculos es necesario conocer las propiedades plásticas como el límite elástico ($R_{p0.2}$) y la resistencia a la tracción (UTS) y; sus propiedades elásticas y físicas como rigidez (E), expansión térmica (ET), conductividad térmica (CT), difusividad térmica (DT), densidad (δ), módulo de Poisson (ν) y capacidad calorífica (C) [5].

Durante la aplicación de estos modelos, se tiene en cuenta los cambios de temperatura que pueden sufrir los sistemas de CNAI durante su operación. Es por esto que se debe conocer las propiedades plásticas, elásticas y físicas mencionadas en el rango de temperaturas entre 25 °C, temperatura en el momento de montaje y parada de la central, y 350 °C, temperatura máxima alcanzada durante un evento tipo Design Basis Accident (DBA) (ver siguiente sección) [5].

Debido a la cantidad de sistemas involucrados en la operación de la central, y la cantidad de componentes que conforman a cada sistema, realizar esta tarea conlleva una alta complejidad [6, 7]. Además, se debe tener en cuenta que dado la fecha de diseño y construcción de la central, la información detallada de la composición y propiedades de los materiales que componen estos sistemas puede no estar disponible en su totalidad.

Durante la **Parte II** de este trabajo se desarrollarán metodologías con las cuales se estandarice la recopilación de la información mencionada arriba y la estimación de las propiedades de los materiales que componen los sistemas alcanzados por aquellos TLAAs que involucren la resolución de problemas termomecánicos.

2.2. Mitigación de un accidente severo

Otro de los lineamientos estipulados por la ARN para permitir la extensión de vida de CNAI, refiere a la capacidad de la planta de resolver las consecuencias de un accidente severo.

Durante la operación de una central nuclear, existen ciertos eventos, denominados Anticipated Operation Occurrences (AOO), que provocan una desviación de un proceso operacional, pero que bajo los criterios de diseño de la planta, son esperados que ocurran al menos una vez durante su operación y por lo tanto no provocan un daño significativo a los elementos de seguridad, o no conducen a los denominados Accident Conditions (o condiciones accidentales, ver **Fig. 2**).

Las condiciones accidentales son desviaciones de la operación normal de la central, pero que tienen una menor probabilidad de ocurrencia y sus consecuencias son más severas que las de un AOO. Este grupo de condiciones está comprendido por aquellas provocadas por los accidentes denominados Design Basis Accident (DBA), accidentes que conducen a condiciones para las cuales la central ha sido diseñada y cuyos liberaciones de material radiactivo son mantenidos en niveles aceptables; y los denominados Design Extension Conditions (DEC), que son condiciones provocadas por accidentes que no están considerados dentro de los DBA. Los DEC a su vez, comprenden tanto condiciones que no involucren un daño significativo al combustible del reactor como aquellos eventos que generan una fusión del núcleo. A los accidentes que provocan este último tipo de evento se los denomina accidente severo. En la **Fig. 2** se muestra un diagrama en donde se resumen los distintos estados de una central nuclear.

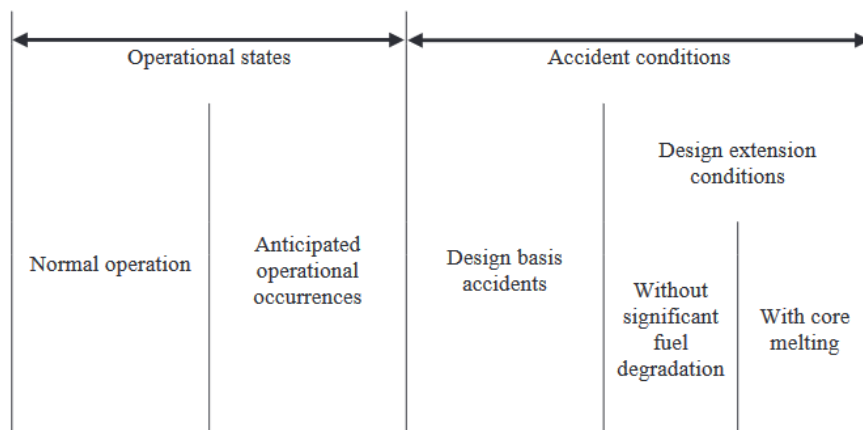


Fig. 2: Diagrama resumen de los estados de una central nuclear [8].

Con el objetivo de cumplir con lo estipulado por la ARN, CNAI debe ser estructuralmente modificada de manera de poder mitigar los efectos de un accidente severo. Es por esto que, en la **Parte III** de este trabajo, se presentará un dispositivo, denominado Barrera Anti-derrame de Núcleo Fundido, con el cual actuando de manera pasiva, se disminuirán los efectos que pudiera ocasionar un accidente con fusión del núcleo. Mediante la recopilación de experiencia interna y externa a NA-SA se propondrá un diseño y materiales para construir la barrera, de manera de poder adaptarse a las condiciones de CNAI.

METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DE MATERIALES DE CNAI

1. Desarrollo

Los materiales a los cuales se les busca definir sus propiedades en este trabajo, constituyen los distintos componentes (cañerías, bombas, válvulas, etc.) que forman parte de los sistemas de CNAI (intercambiadores del sistema del moderador, bombas del circuito del moderador, etc.). Estos materiales y sus componentes asociados se encuentran identificados mediante un sistema de índices interno de NA-SA que permiten su búsqueda en una lista de materiales. De esta manera se puede identificar con un nombre estandarizado o comercial el material que constituye el componente y la documentación técnica asociada al mismo.

La recopilación de propiedades plásticas, elásticas y físicas de los materiales que componen los sistemas de CNAI se completa a partir de la información proporcionada por las especificaciones técnicas asociadas a estos componentes, emitidas durante la época de diseño y construcción de la central (1962-1974). De estos documentos se busca obtener valores mínimos exigidos de las propiedades mencionadas en la sección anterior, en el rango de temperaturas entre 25 y 350 °C, de los productos semi-elaborados (barras, tubos, forjados, etc.) a partir de los cuales los componentes fueron fabricados. Estos valores son definidos a partir de estándares de fabricación de la época y por lo tanto, aseguran que todo producto fabricado bajo estos estándares cumple con la calidad de material en ellos estipulada. En algunos casos, junto a las especificaciones técnicas es posible encontrar certificados de fabricación, en donde se detallan ensayos realizados sobre los productos semi-elaborados, a partir de los cuales se obtienen valores de propiedades de materiales y composición química. Sin embargo, debido a diferentes razones, estos documentos no se encuentran disponibles para la totalidad de los componentes de CNAI. En otros casos, aún cuando el documento se encuentre disponible, la información detallada en éste puede no resultar suficiente para definir una propiedad en el rango de temperaturas necesario. Es por esta razón, que en la primera parte de este trabajo se describirá el desarrollo de métodos con los cuales se estandariza la recopilación de la información de los materiales pertenecientes a CNAI y la forma de estimar las propiedades de los mismos en el rango de temperaturas mencionado. En la siguiente sección se mencionarán las bases de construcción de estos métodos y los distintos criterios adoptados durante su aplicación.

A diferencia de las propiedades plásticas, las propiedades elásticas y físicas que resultan de la aplicación de estas metodologías, son introducidas en los modelos termomecánicos mencionados en la sección **2.1** de la **Parte I**, como parámetros que afectan el resultado de los mismos. Debido a la naturaleza compleja de los modelos, no es posible predecir el efecto directo sobre el estado tensional que ocasionaría un cambio en los valores de estas propiedades. Teniendo esto en cuenta, los criterios conservadores tomados durante la recopilación de información de las propiedades plásticas, no son aplicables al modo de recopilación de las propiedades elásticas y físicas. Es por esta razón, que la metodología de estimación de propiedades plásticas se presentará separada de la metodología de estimación de propiedades elásticas y físicas.

1.1. Bases y criterios para la estimación de propiedades plásticas

Como se ha mencionado en la sección anterior, la información recopilada de las normas y certificados de los componentes de CNAI, no siempre resulta suficiente para poder detallar el comportamiento de las propiedades plásticas, en el rango de temperaturas buscado. Es así

que, de manera de poder completar la información faltante, se deberá contar con otra fuente de información que detalle las propiedades de un material semejante. En estos casos, será necesario definir un material similar a partir del cual se puedan estimar las propiedades del material original. En este contexto se entiende por material similar, como aquel que contenga el mismo conjunto de elementos aleantes y en cantidades semejantes a un material original y; que sea utilizado para fabricar un componente (producto semi-elaborado o final) similar al cual constituye el material original. Esta definición se basa en el supuesto que materiales de composición química y tratamiento termomecánico semejante, presentarán un comportamiento de propiedades plásticas similares. En ciertas ocasiones se permitirá la presencia de aleantes no presentes en el material original, siempre que pueda presumirse que su presencia en la aleación no altera de manera significativa el comportamiento mecánico del material.

Las propiedades plásticas son fuertemente dependientes de las características microestructurales de un material policristalino, como es el caso de los aceros y otras aleaciones tratadas en este trabajo. Dada una misma composición química, es posible obtener un rango de valores de estas propiedades, alterando su microestructura mediante una modificación en el procesamiento del material. Los tratamientos termomecánicos realizan cambios en la microestructura, como puede ser en el tamaño de grano, la densidad de dislocaciones o las fases presentes en ella, que modifican su comportamiento plástico. Es por esto que dentro de la definición de material similar, debe introducirse además, la necesidad de que el producto a partir del cual se obtengan las propiedades buscadas haya sufrido tratamientos termomecánicos, es decir, tratamientos térmicos y deformación en frío, en tibio o en caliente, similares a los del material original.

Con la definición de un material similar, surge un problema asociado a la fuente a partir de donde se recopila la información de sus propiedades. El inconveniente se debe a que esta fuente detalla las propiedades de un material de fabricación contemporánea, mientras que el estándar de fabricación del producto semi-elaborado a partir del cual se ha fabricado el componente, que en este momento se encuentra operando en CNAI, fue definido a partir de los criterios de fabricación de la época (50 años atrás). El avance de la ciencia de materiales y la tecnología de fabricación ha permitido obtener productos más resistentes (mecánicamente) y los estándares de fabricación se han vuelto más estrictos. Es por esto que incluso cuando se comparan los valores mínimos exigidos de las propiedades plásticas de un material fabricado durante la época de diseño y fabricación de la central, con las del mismo material fabricado durante los últimos años, se encuentra una situación como la mostrada en la **Fig. 1**, en donde los valores de las propiedades de ambos materiales no coinciden a baja y/o alta temperatura.

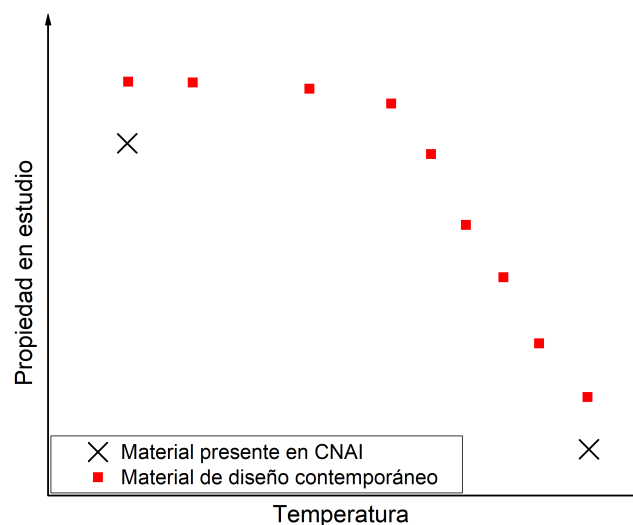


Fig. 1: Situación posible a encontrarse durante la revisión de la información disponible de un material de CNAI y su comparación con un material similar contemporáneo.

Durante la aplicación de esta metodología, esto se resolverá al corregir la curva de tendencia de una propiedad del material similar, al valor de la del material original de baja temperatura. Esta acción se basa en el supuesto que, componentes fabricados a partir de materiales de composición química y tratamiento termomecánico semejantes, presentan comportamientos de propiedades plásticas similares frente a cambios en la temperatura, es decir, curvas de tendencias similares y que; debido a que los estándares de fabricación de los componentes utilizados en los sistemas de CNAI han sido adaptados para reflejar condiciones de fabricación más estrictas a alta temperatura, los valores de estas propiedades a baja temperatura no definen estos comportamientos. De todas maneras, durante la búsqueda de materiales similares, se cerciorará que la diferencia entre los valores de baja temperatura de las propiedades plásticas, no difieran de manera significativa de los mismos correspondientes al material original. Teniendo esto en cuenta, la selección del mejor material similar a partir del cual se estimarán las propiedades del material original, se realizará en función de los valores de alta temperatura de las propiedades $R_{p0.2}$ y UTS, al calcular una serie de parámetros que permitirán evaluar la similitud entre ambos.

Esta comparación de materiales a partir de sus valores de propiedades plásticas se basa en que, los resultados de ensayos a partir de los cuales se obtienen estas propiedades, son independientes de las características geométricas de las probetas. Además, en los casos en los que el producto en estudio presente una anisotropía en estas propiedades debido a su procesamiento, se supone que las propiedades mencionadas en las especificaciones y certificados refieren a la mayor de las posibles a obtener mediante ensayos [9]. De esta manera, es posible comparar dos especificaciones que remiten a dos materiales distintos.

Aún así, existen casos en los que no resulta suficiente comparar las propiedades $R_{p0.2}$ y UTS para definir la similitud entre dos materiales, con lo que se considera que al incorporar información de la ductilidad de ambos, se provee de un punto de comparación complementario. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los resultados de los ensayos a partir de los cuales se obtienen valores de esta propiedad, dependen tanto de la orientación con la que se haya extraído una probeta a ensayar, como de las características geométricas de las probetas [9]. Es por esto, que en caso de utilizar datos de ductilidad para realizar una comparación entre dos materiales distintos, se debe garantizar primero que las condiciones de ensayo a partir de las cuales se tomaron dichos datos hayan sido idénticas.

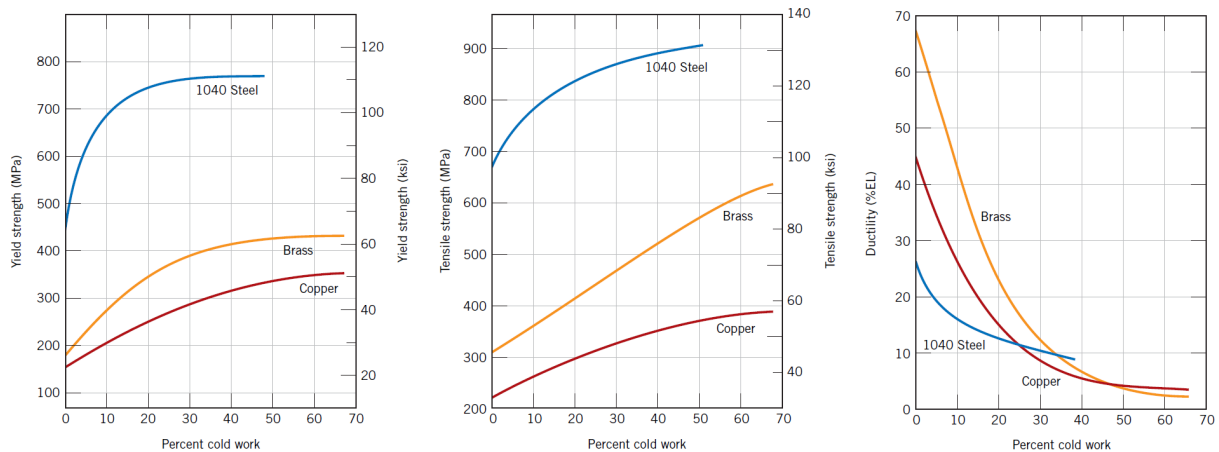


Fig. 2: Comparación de la variación de propiedades plásticas de distintas aleaciones con el trabajado en frío [10].

Es bien conocido que las propiedades relacionadas a la resistencia mecánica de un material metálico, como el límite elástico y la resistencia a la tracción, son contrarias a las relacionadas con la capacidad para deformarse plásticamente, como la ductilidad y la tenacidad. Estas propiedades son influenciadas simultáneamente por procesos de fabricación como son el trabajado

mecánico (ver **Fig. 2**) y los tratamientos térmicos (ver **Fig. 3**). Teniendo esto en cuenta, es posible relacionar dos materiales al comparar un juego de cada una de estas propiedades y así obtener conclusiones respecto de la similitud entre ambos. Esto será utilizado durante esta metodología, al incorporar los valores exigidos de ductilidad a los parámetros mencionados anteriormente, para seleccionar un material similar adecuado.

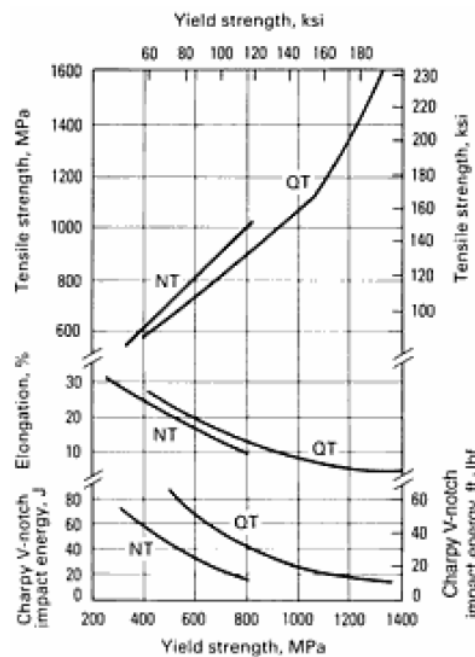


Fig. 3: Comparación de la variación de propiedades mecánicas de aceros fundidos de baja aleación normalizados y revenidos (NT) y templados y revenidos (QT) [11].

Durante la estimación de las propiedades de los materiales que constituyen los componentes de CNAI, se toman criterios conservadores que apuntan a disminuir la posibilidad de una interpretación errónea de los resultados de los TLAAs. Estos criterios incluyen la elección de los valores mínimos exigidos por sobre los valores obtenidos a partir de ensayos, ambos detallados en los documentos asociados a cada componente, como se muestra en la **Fig. 4**. Esto se debe a que los valores mínimos exigidos aseguran una cota mínima para las propiedades y son el resultado de un análisis estadístico sobre varios ensayos realizados sobre cada material, mientras que los valores de ensayos son generalmente valores notablemente superiores (ver **Fig. 4**). Otro criterio conservador apunta a la elección de los materiales similares cuyas propiedades plásticas resulten ser menores que las del material original.

El resultado de esta metodología se considera completo cuando se haya logrado obtener, de las propiedades plásticas mencionadas, valores en el rango de 25 a 350 °C y cada 50 °C. En ciertas ocasiones, en las cuales la información recopilada del material original resulte suficiente o, en los que la información encontrada de un material de diseño contemporáneo no se encuentra detallada como se muestra en la **Fig. 1**, será necesario aplicar funciones de interpolación de manera de aproximar la información faltante. Es para esto que se desarrollaron una serie de programas en MATLAB a partir de los cuales se crean funciones de aproximación a una serie de datos. El funcionamiento de estos programas es descripto en el **Anexo A**.

Blatt 2 Prüf-Nr. 69552/8a/Wei

1. Besichtigung und Ausmessung: Kein Anstand

2. Kalt- } Abmessungen: 20 x 20 x 150
 -Abschreck- } Biegeversuch: Dorndurchmesser: 3a
 Biegewinkel: 180°

3. Wasserdruckversuch: --- kg/cm²

4. Zerreiß- } Versuch: a) DVM ungealtert, Prüftemperatur +20°C
 Kerbschlag- } b) ISO V ungealtert, Prüftemperatur +10°C
 Warmstreckgrenze (60,2) bei 350°C: min. 22 bzw. 21 kg/mm²

Probe-Nr.	Abmessungen mm	Querschnitt mm²	Meßlänge mm	Streck- grenze kg/mm²	Festigkeit kg/mm²	Dehnung 5 % %	Ein- schäürung %	Brinell Härte kg/mm²	Kerbzähigkeit mkg/cm² (Probeform)
Anforderungen:				min. 34	55-65	1100 6-B	---	a) 4,0 (DVM) b) 4,0 (ISO-V)	
4096 A T	10,0 Ø	78,5	50	39,6	59,5	31,6	70	T a) 18 19 19 L 16 19 20 T b) 10 11 13	
Warmstreckgrenze (60,2)				T 24,9 bei 350°C nach DIN	50112, P.8				
Warmstreckgrenze (60,2)				L 25,1 " " " "	" " " "				
4096 B T	10,0 Ø	78,5	50	36,4	58,9	29,6	71	T a) 18 15 16 L 14 16 16 T b) 8,4 8,4 12	
Warmstreckgrenze (60,2)				T 25,6 bei 350°C nach DIN	50112, P.8				
Warmstreckgrenze (60,2)				L 25,1 " " " "	" " " "				
4097 A T	10,0 Ø	78,5	50	40,7	56,0	29,6	71	T a) 15 15 15 b) 8,4 8,5 9,3	
Warmstreckgrenze (60,2)				T 30,8 bei 350°C nach DIN	50112, P.8				
4097 B T	10,0 Ø	78,5	50	43,6	62,1	26,4	66	T a) 16 16 15 b) 9,2 7,8 8,8	
Warmstreckgrenze (60,2)				T 34,2 bei 350°C nach DIN	50112, P.8				
T = tangential L = längs Die Proben wurden bei 570° C spannungsfreigelegt, Haltezeit 45 Minuten. Chemische Analyse laut Werksangabe:									
Schmelze	C %	Si %	Mn %	P %	S %				
335051	0,21	0,52	1,57	0,025	0,018				

Ergebnis der Prüfung: Die gestellten Anforderungen wurden erfüllt.

Technischer Überwachungs-Verein Wien

Linz, den 24. Okt. 1969 Der Sachverständige:

Fortsetzung Bl. 3

M 6. 69 2680 21a

Fig. 4: Documentación técnica típica tratada durante la aplicación de las metodologías de estimación de propiedades. Se detalla en 1) valor mínimo exigidos de $R_{p0,2}$ a alta temperatura, 2) valores mínimos exigidos de $R_{p0,2}$, UTS, ductilidad y tenacidad a baja temperatura y 3) valores obtenidos a partir de ensayos a baja y alta temperatura de las mismas propiedades [12].

1.2. Bases y criterios para la estimación de propiedades elásticas y físicas

De igual manera que para las propiedades plásticas, las propiedades elásticas y físicas raramente se encuentran descritas en las especificaciones, en la manera en la que los modelos termodinámicos las exigen. Es por esto que, aquí también se requerirá encontrar información complementaria para poder completar el comportamiento de estas propiedades en el rango de 25 a 350 °C.

Sin embargo, para estos casos, no se realizará una búsqueda de materiales similares como se ha descrito para la metodología anterior, sino que se tomarán los valores de las propiedades descritas en el código ASME BPVC II D [13], como se detallará más adelante. Esto se debe, por un lado, a que los criterios tomados para la selección de un material similar según las propiedades plásticas, no aseguran que el material seleccionado represente fielmente todas las propiedades elásticas y físicas del material original y; por otro lado, que estas propiedades son definidas en el código mencionado, para materiales agrupados por composición química y no así, para cada material en particular, como lo hace en el caso de las propiedades $R_{p0.2}$ y UTS.

De manera similar a la anterior, el resultado de esta metodología se considera completo cuando se haya recopilado y/o estimado información de cada una de las propiedades elásticas y físicas mencionadas, en el rango de temperaturas de 25 a 350 °C y cada 50 °C. En los casos en los que la información recopilada de estas propiedades se considere suficiente, aquí también se dará uso de los programas desarrolladas en MATLAB para interpolar los valores faltantes.

En la siguiente sección se presentarán las metodologías desarrolladas en este trabajo para resolver la problemática introducida en las secciones **2.1** de la **Parte I** y **1** de la **Parte II**.

2. Resultados

En esta sección se presentarán las metodologías para la estimación de propiedades de materiales de CNAI. El objetivo de las mismas es obtener valores de las propiedades mencionadas en la sección 2.1, de un material en un rango de temperaturas entre 25 y 350 °C. Estas metodologías serán divididas en una sección dedicada a la estimación de propiedades plásticas ($R_{p0,2}$ y UTS) y otra a la obtención de propiedades elásticas y físicas (E , CT , DT , ET , δ , C y ν). Para estimar las propiedades de un material, se seguirán una serie de pasos con los cuales se recolectará información del material original en cuestión, y en caso de ser necesario, de un material similar del que se pueda obtener información complementaria. En cada paso se indicará la manera de operar para recopilar información de la propiedad buscada de un material. Dentro de un paso, se podrán encontrar distintos caminos, los cuales indican cómo resolver las distintas situaciones que pueden surgir al ejecutar cada paso. De esta manera, en cada paso se deberá seguir un único camino, el cual llevará al usuario al siguiente paso.

Al utilizar estas metodologías, se debe tener en cuenta que el hecho de tomar un criterio conservador para la estimación de una propiedad, no garantiza que se esté haciendo lo mismo para otra propiedad. Esto es particularmente cierto en el caso de propiedades como límite elástico o resistencia a la tracción contra propiedades de ductilidad o tenacidad, o variables que de ellas dependan [14].

2.1. Metodología de estimación de propiedades plásticas

A continuación se detallarán los pasos a seguir para la estimación de propiedades plásticas. En la **Fig. 5** se muestra el diagrama de flujo asociado a esta metodología en donde se resumen los pasos a seguir.

Durante la aplicación de esta metodología se resolverá simultáneamente la recopilación de información de las propiedades $R_{p0,2}$ y UTS. Para comenzar con el análisis será necesario contar con la composición química del material original y, de cada propiedad, un valor mínimo exigido a baja temperatura, un valor de ensayo y/o un valor mínimo exigido a alta temperatura.

■ Paso 1: Identificación de material

A partir de planos y lista de materiales se identificará la designación del material que constituye al componente en cuestión y el tipo de producto semi-elaborado a partir del cual se ha fabricado (forjado, fundido, tubo sin costura, etc.). Esta designación debe proveer suficiente información como para permitir su búsqueda y evitar ambigüedades (composición química, tratamiento termomecánico, etc.).

■ Paso 2: Revisión de documentación asociada y recopilación de datos de material original

Con la información obtenida del paso anterior se procederá a buscar en los archivos de NA-SA, reglas de diseño y especificaciones o certificados del componente a analizar.

De las especificaciones y reglas de diseño se buscará obtener valores mínimos exigidos de las propiedades plásticas tanto a baja como alta temperatura y de los certificados se tomará el mínimo valor obtenido a partir de ensayos, de cada propiedad a las temperaturas indicadas en el mismo, junto con resultados de análisis de composición química del material.

En ciertos casos será posible reconocer la norma o código de fabricación del componente (DIN, KTA, BS, EN, etc.). De ser así, se realizará una búsqueda de estos documentos, para obtener de los mismos una descripción más detallada de las propiedades del componente. Debe cerciorarse que la normativa utilizada haya sido emitida en la fecha más cercana posible a la de diseño y fabricación de CNAI y que las características del componente del cual se tomarán los valores de las propiedades, coincidan con las del componente original de CNAI (tratamiento termomecánico, dimensiones, tolerancias, etc.).

Dependiendo de la información hallada se procederá a alguno de los siguientes caminos:

Camino 2.1: En caso en que de ambas propiedades se haya obtenido valores mínimos exigidos a 25 °C y a 350 °C junto con dos o más valores a temperaturas intermedias, espaciados a menos de 150 °C en este rango, o una configuración más detallada, se procederá al **Paso 5**.

Camino 2.2: En caso en que alguna o ambas propiedades no se encuentren detalladas como se indica en el camino anterior, pero se cuente con un valor mínimo exigido a alta temperatura de alguna de las propiedades, será necesario definir un material similar con el cual completar la/s propiedad/es. Para esto, se deberá conocer la composición química del material original que constituye el componente analizado. Una vez obtenida la composición química, se procederá al **Paso 3**. En caso que esta información no haya sido obtenida a partir de los documentos pertinentes, será necesario realizar mediciones en planta del componente mediante ensayos no destructivos.

Camino 2.3: De no haberse hallado un valor mínimo exigido a alta temperatura para ninguna de las propiedades plásticas buscadas, se realizará una penalización a partir de valores de ensayos a alta temperatura, obtenidos de los certificados del componente. Para esto, se completará el rango faltante con el mínimo valor de ensayo encontrado para cada propiedad, excepto en el valor conocido de baja temperatura. Una vez hecho esto, se procederá al **Paso 5**.

■ Paso 3: Búsqueda de materiales similares

Se buscarán materiales similares de manera de estimar los valores de la propiedad que no se haya podido completar en el paso anterior. Para ello, se realizará una búsqueda rápida por comparación de composición química, en la lista de materiales equivalentes encontrados en el informe realizado por el Grupo de Inspección e Ingeniería de Materiales y Componentes de la Gerencia Materiales del Centro Atómico Constituyentes [14]. En caso de no encontrar un material similar en esta fuente, se buscarán los materiales sugeridos para la fabricación del tipo de componente en cuestión, en estándares actuales como los encontrados en el código ASME BPVC II A 1 y 2 y en el reporte técnico del EPRI “Materials Handbook for Nuclear Plant Pressure Boundary Applications (2015)” [15] u otras fuentes disponibles. Aún de haber encontrado materiales similares en la fuente [14], se recomienda realizar esta búsqueda.

A partir de la designación de los materiales similares encontrados en las fuentes mencionadas, se buscarán especificaciones o normativas de fabricaciones actuales, de componentes semejantes al componente original de CNAI en cuestión, que involucren dichos materiales. De estos documentos se tomarán valores de la propiedad a completar en el rango de temperaturas de 25 a 350 °C. De aquellos materiales que pertenezcan al código ASME, se empleará lo indicado en la versión 2015 del código ASME BPVC Sección II D [13]. Una vez conseguidas estas propiedades, se compararán los valores de las mismas a 25 °C entre los materiales similares candidatos y el original, para descartar aquellos cuya diferencia relativa porcentual en alguna de las propiedades resulte mayor a un 15 %.

De los materiales similares, se deberán obtener valores de la propiedad a completar a 25 °C y a la temperatura máxima conocida del material original que pertenezca al rango en el cual se desea estimar sus propiedades. Además, se requerirá obtener como mínimo, dos valores a temperaturas intermedias que no disten a más de 150 °C entre sí. Para completar la tendencia de la misma, en caso de ser necesario, se utilizará el programa selectfit4.m con el cual se obtendrá una curva de interpolación a los datos obtenidos del material similar.

Una vez armada una lista de materiales similares candidatos y sus propiedades, se deberá definir el material similar más adecuado para la estimación de las propiedades del material original. Para esto se procederá al **Paso 4**.

■ Paso 4: Definición del mejor material similar

En esta instancia se elegirá de los materiales similares candidatos encontrados en el paso anterior, el más adecuado para estimar las propiedades del material original que constituye el componente de CNAI. Dependiendo de la información recopilada del material original, se procederá a establecer criterios de selección del material similar:

Camino 4.1: En el caso en que de ambas propiedades se haya obtenido del **Paso 2**, un valor mínimo requerido tanto a baja temperatura como a alta temperatura para el material original, la elección del mejor material similar se realizará en función de la cercanía entre los valores de alta temperatura pertenecientes al material original y al similar para cada propiedad.

Para esto, se corregirán las curvas de tendencia de cada material similar candidato, de manera que coincidan con el valor de baja temperatura del material original. Así, se obtendrá el valor corregido de alta temperatura de ambas propiedades de los materiales similares. Una vez hecho esto, se calcularán las diferencias relativas porcentuales entre los valores de ambos materiales para cada propiedad, según:

$$d_{Rp0,2_i} = 100(1 - \frac{Rp0,2_0}{Rp0,2_i}) \quad (1)$$

$$d_{UTS_i} = 100(1 - \frac{UTS_0}{UTS_i}) \quad (2)$$

en donde los $d_{...i}$ son las diferencias relativas porcentuales entre los valores de las propiedades del material original $R_{p0,2_0}$ y UTS_0 , y los valores corregidos de las propiedades de cada material similar candidato $R_{p0,2_i}$ y UTS_i a la temperatura máxima del rango a completar. Con los parámetros $d_{...i}$ calculados para cada propiedad y material similar candidato, se procederá a calcular un parámetro $p_i^\uparrow$ de alta temperatura, como el promedio geométrico entre los mismos según:

$$p_i^\uparrow = \sqrt{|d_{Rp0,2_i} d_{UTS_i}|} \quad (3)$$

De esta manera, el mejor material similar será aquel cuyo valor de $p_i^\uparrow$ resulte ser menor, siempre que ninguno de los $d_{...i}$ haya resultado ser mayor a 7,5 %. Durante la elección del mejor candidato se priorizarán aquellos cuyos valores de las propiedades a alta temperatura sean menores a los correspondientes al material original a la misma temperatura, es decir, aquellos cuyos $d_{...i}$ resulten negativos.

En los casos en los que los valores de los parámetros $d_{...i}$ resulten ser positivos, se permitirá validar las tendencias de la curva de una propiedad de los materiales similares, al evaluar que ésta quede por debajo del valor de ensayo a alta temperatura del material original. En todo caso que se utilice un valor de ensayo, se restringirá la utilización de las propiedades obtenidas del material resuelto mediante esta metodología, únicamente a los componentes presentes en CNAI, fabricados a partir del producto semi-elaborado de cuyo certificado se obtuvieron los valores de ensayo.

Si el parámetro $p_i^\uparrow$ resulta ser mayor a 7,5 % y menor a 15 % para todos los materiales similares candidatos, será necesario comparar otros aspectos de los mismos. Para esto, se buscarán valores requeridos de ductilidad en normas o especificaciones, definidos como elongación a la rotura, para el material original y los similares candidatos. Con estos valores se calculará un nuevo parámetro d_{A_i} de igual manera que los anteriores, para luego calcular un nuevo promedio de alta temperatura según:

$$j_i^\uparrow = \sqrt{|d_{Rp0,2_i} d_{UTS_i} d_{A_i}|} \quad (4)$$

Si para algún material similar candidato, este nuevo parámetro resulta menor a 7,5 %, el mejor material similar será aquel que posea el menor de estos. En cambio, si para todos los materiales similares los valores de $j_i^\uparrow$ quedan en el rango de 7,5 % a 15 %, se calcularán parámetros $d_{Rp_{0,2}}$, d_{UTS} , d_{A_i} con los valores de cada propiedad a 25 °C; con estos un nuevo $j_i^\downarrow$ al igual que el anterior y finalmente un nuevo parámetro:

$$r_i = \sqrt{j_i^\uparrow j_i^\downarrow} \quad (5)$$

De esta manera el mejor material similar será aquel que posea el menor valor de r .

El cálculo de los parámetros d_{A_i} se podrá realizar únicamente en el caso en que pueda asegurarse que los valores de ductilidad se hayan obtenido mediante especificaciones equivalentes entre el material original y los similares candidatos, es decir, que las condiciones de los ensayos a partir de los cuales se haya medido esta propiedad sean idénticas. En particular se debe conocer la geometría de la probeta de ensayo y la dirección respecto del producto a partir de la cual se la ha tomado.

Si el parámetro $p_i^\uparrow$ resulta ser mayor a 15 % para todos los materiales similares candidatos, se realizará una penalización en lugar de definir un material similar. Esta penalización consta en completar el rango faltante de las propiedades del material original, con el valor conocido de este material correspondiente a la mayor temperatura conocida que pertenezca al rango de temperaturas a completar.

Camino 4.2: En el caso en que no se cuente con valores mínimos exigidos a alta temperatura de alguna propiedad, se procederá de manera similar al **Camino 4.1**, excepto que la elección del mejor material similar se realizará en función del parámetro $d_{...}$ correspondiente a la propiedad de la cual se conozcan datos a alta temperatura, en lugar del parámetro $p_i^\uparrow$.

Paso 5: Finalización

Una vez colectada la información pertinente del material original sobre cada propiedad y, en caso de ser necesario, haber elegido un material similar, se completará la información de las propiedades. Para esto se detallarán los valores de cada una en una tabla como las mostrada debajo (**Tabla 1**), en la cual se mostrará además la fuente de donde se han obtenido los valores de las propiedades.

Propiedad	Temperatura [°C]								Referencia
	25	50	100	150	200	250	300	350	
$Rp_{0,2}$ [MPa]									
UTS [MPa]									

Tabla 1: Modelo de tabla utilizada para presentar los resultados de la metodología de estimación de propiedades plásticas.

En el caso en que no haya sido necesario definir un material similar pero la información hallada del material original no sea suficiente para completar la tabla, se utilizará el programa selectfit4.m para interpolar los valores faltantes. En cambio, de haberse definido un material similar se utilizará la curva de tendencia generada durante los pasos anteriores para completar únicamente el rango de temperaturas de la/las propiedad/es para la/s que no se conozca/n valores mínimos exigidos del material original.

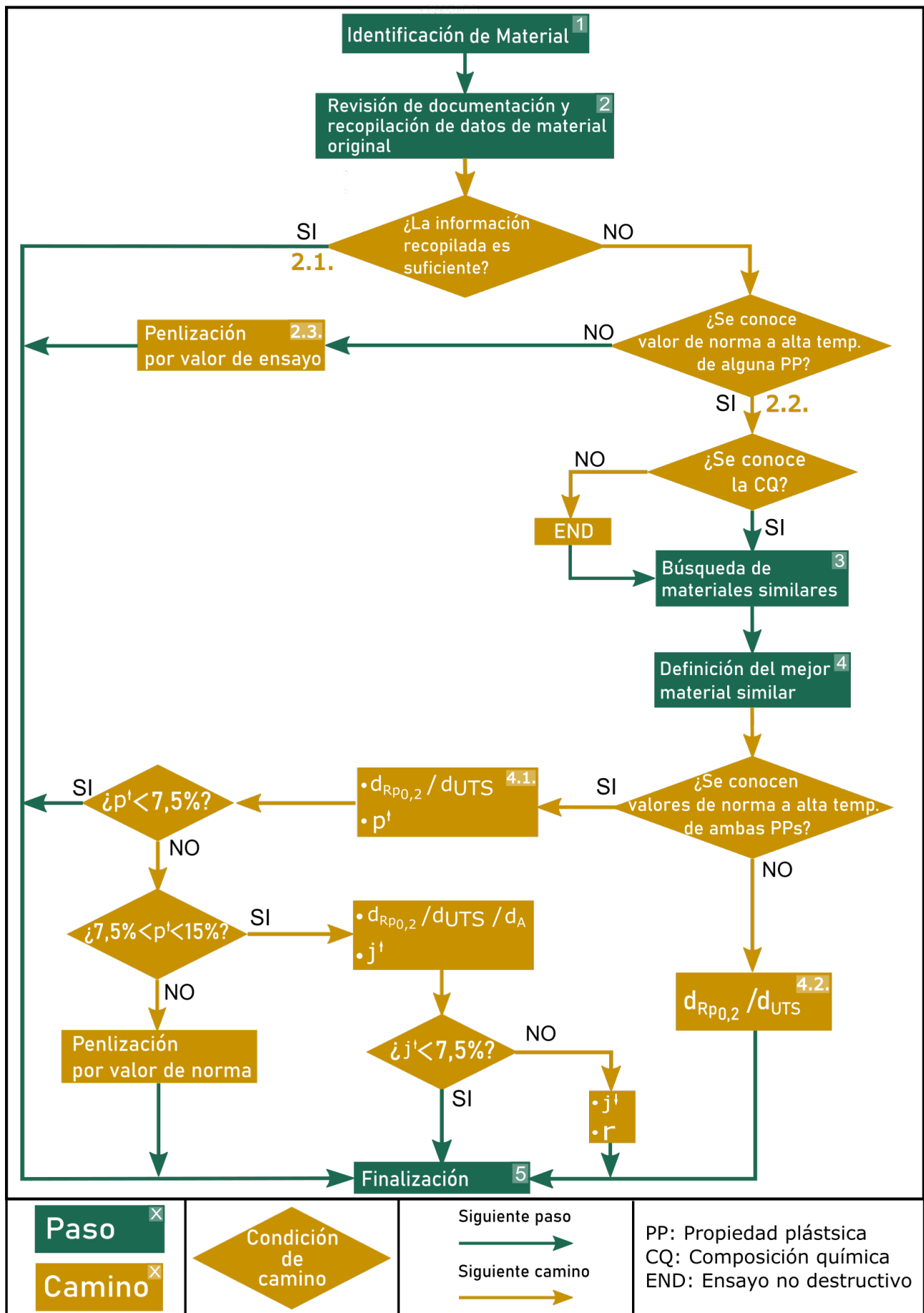


Fig. 5: Diagrama de flujo de la metodología para estimación de propiedades plásticas.

2.2. Metodología de estimación de propiedades elásticas y físicas

A partir de esta metodología se completarán las propiedades elásticas y físicas rigidez (E), expansión térmica (ET), conductividad térmica (CT), difusividad térmica (DT), densidad (δ), módulo de Poisson (ν) y capacidad calorífica (C) en el rango de temperaturas de 25 a 350 °C.

Habiendo ejecutado la metodología anterior, la designación y composición química del material serán conocidas, y los documentos a partir de los cuales se obtuvieron las propiedades plásticas habrán sido recopilados. Esta metodología será aplicada una vez por cada propiedad elástica o física. Es por esto y por lo comentado en la sección 1 de la **Parte II** que la metodología para la estimación de propiedades físicas y elásticas difiere de la explicada en la sección anterior.

A diferencia de las demás propiedades, los valores de densidad y módulo de Poisson se tomarán constantes para toda temperatura, siguiendo lo establecido en el código ASME. Además, los valores de la capacidad calorífica serán obtenidos mediante cálculo según la fórmula indicada en el código ASME BPVC II D, pág. 782 [13]:

$$C = \frac{CT}{\delta \cdot DT} \quad (6)$$

A continuación se detallan los pasos a seguir para la estimación de propiedades elásticas y físicas. En la **Fig. 6** se muestra el diagrama de flujo asociado a esta metodología.

■ Paso 1: Recopilación de datos de propiedad

A partir de los documentos obtenidos de la metodología anterior se buscarán datos de la propiedad elástica o física requerida en el rango de 25 a 350 °C. En caso de contar con una norma o código de fabricación debe procurarse que haya sido emitido en la época más cercana a la de diseño y fabricación de CNAI.

■ Paso 2: Definición de propiedad

Dependiendo de la información encontrada en el paso anterior, se seguirán los siguientes caminos para definir la propiedad buscada en el rango de temperaturas mencionado.

Camino 2.1: En el caso en que se hayan encontrado valores de la propiedad detallados en todo el rango de temperatura, o valores a 25 °C y a 350 °C, junto con dos o más valores a temperaturas intermedias espaciadas no más de 150 °C, se utilizarán estos valores para definir la propiedad. Para este último caso se aplicará el programa selectfit4.m para crear una curva de interpolación a los datos conocidos y con la misma obtener valores de la propiedad a las temperaturas faltantes. Una vez hecho esto se procederá al siguiente paso.

Camino 2.2: En el caso en que del **Paso 1** se haya obtenido una configuración de valores menos detallada que la descrita en el **Camino 2.1**, se buscará un material o grupo de materiales del código ASME BPVC Sección II D [13], cuyos valores de la propiedad buscada indicada en este código mejor aproximen a los obtenidos de los documentos del material original. Una vez encontrado el material o grupo de material ASME, se tomará de éste los valores de la propiedad en todo el rango de temperaturas y se procederá al siguiente paso.

Camino 2.3: En caso en que no se indiquen valores de la propiedad buscada en los documentos encontrados para el material original, se buscará en el código ASME BPVC Sección II D [13] valores de esta propiedad, indicados para el material o grupo de materiales más cercano en composición química al original. Una vez tomados estos datos se procederá al paso siguiente.

En el caso en que no se encuentre la información de la composición química del material original en los documentos pertinentes al componente en cuestión, será necesario realizar ensayos para adquirir la misma, tal como se indicó en el **Camino 2.2** de la sección anterior.

Durante la resolución de la propiedad expansión térmica (ET), los valores a tomar del código ASME BPVC II D serán los referidos a la columna A (expansión térmica instantánea).

■ Paso 3: Finalización

Con la información recopilada en los pasos anteriores, se completará la **Tabla 2**, mostrada debajo, y se detallará la fuente de la cual se han obtenido estos datos. En el caso de haber construido curvas de tendencia se aplicarán estas funciones para interpolar en los valores de temperaturas faltantes.

Propiedad	Temperatura [°C]								Referencia
	25	50	100	150	200	250	300	350	
E [GPa]									
δ [kg/m^3]									
ν									
ET instantánea [$10^{-6}mm/mm.^{\circ}C$]									
CT [$W/m.^{\circ}C$]									
DT [$10^{-6}m^2/s$]									
C [$J/kg^{\circ}C$]									

Tabla 2: Modelo de tabla utilizada para presentar los resultados de la metodología de estimación de propiedades elásticas y físicas.

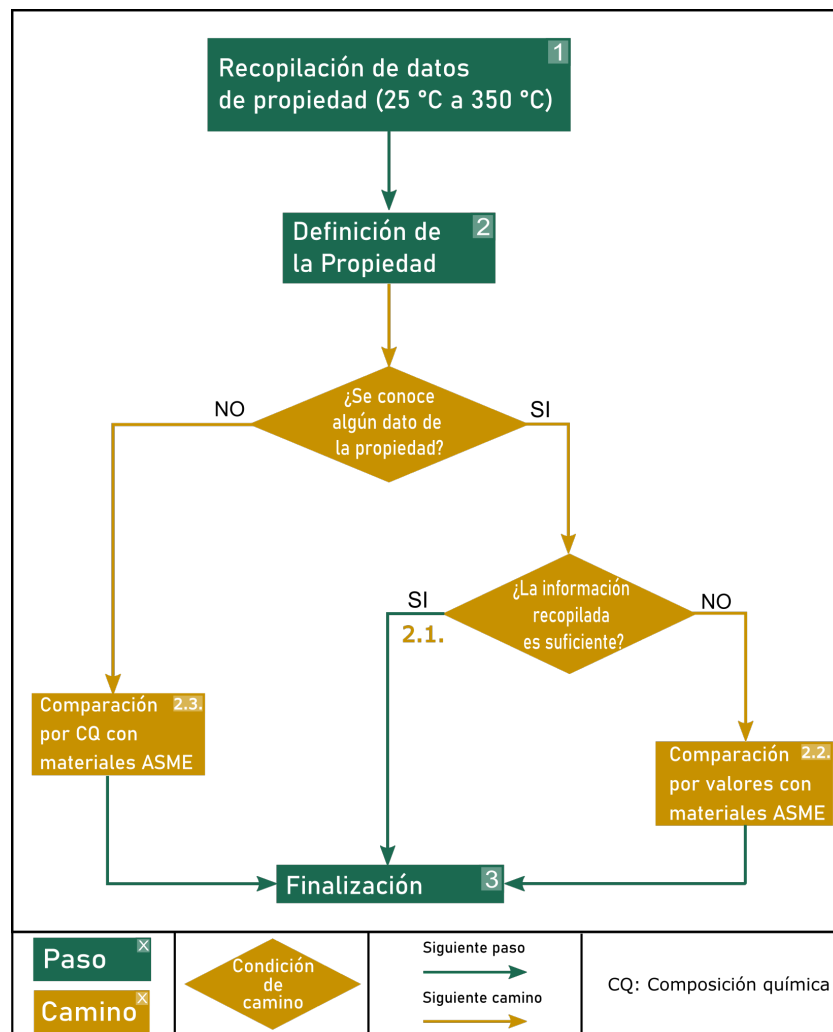


Fig. 6: Diagrama de flujo de metodología de estimación de propiedades elásticas y físicas.

3. Aplicación de las metodologías

En función de las metodologías desarrolladas en la sección anterior, se demostrará a continuación su aplicabilidad a componentes de CNAI. Para esto se eligieron tres componentes pertenecientes al sistema del intercambiador de calor del circuito del moderador [6]: bulones de la bomba del circuito del moderador, una carcasa espiral de la misma bomba y un tubo sin costura del intercambiador de calor.

3.1. Bulones de carcasa de bomba del circuito del moderador

3.1.1. Estimación de propiedades plásticas (X5 CrNi 18 9)

Comenzando con la metodología de estimación de propiedades plásticas, se identificó a partir de la lista de materiales de NA-SA asociada al plano en donde se detallan estos componentes (ver **Fig. 7**), que el material que constituyen los mismos es el X5 CrNi 18 9. Siguiendo con el **Paso 2** de la metodología, se buscó en los archivos de NA-SA los documentos asociados a este componente, entre los que se encontró una especificación en la que se referencia la norma DIN 17440. Con el objeto de obtener información de propiedades plásticas y composición química del material original, se buscó la versión más cercana a la época de diseño y construcción de CNAI, encontrándose la emitida en el año 1972. En la **Tabla 3** se muestra la composición química del material X5 CrNi 18 9; y en la **Tabla 4** los valores de las propiedades plásticas junto con las elásticas y físicas, ambas construidas a partir de la información detallada en la norma DIN 17440 encontrada [16].

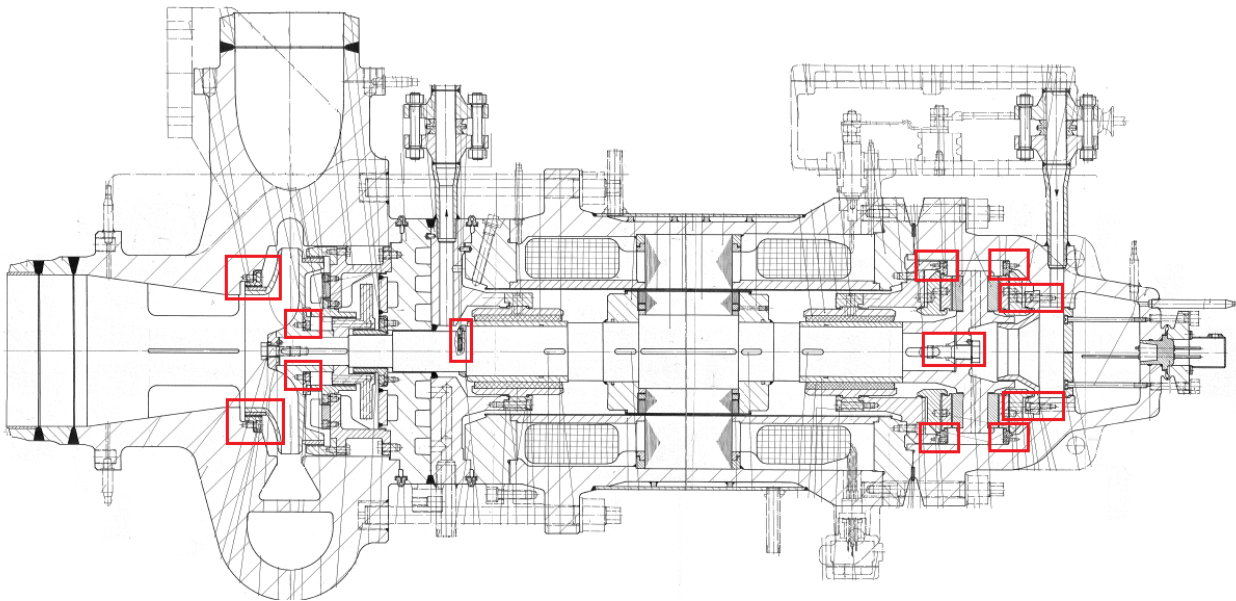


Fig. 7: Se muestran encuadrados en rojo los bulones de la carcasa de la bomba del circuito del moderador.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
X5 CrNi 18 9	0,07	1,0	2,0	0,045	0,030	17,0-20,0	8,5-10,0	-
SA-479 304L	0,030	1,00	2,0	0,045	0,030	18,0-20,0	8,0-12,0	-
SA-479 302	0,15	1,00	2,0	0,045	0,030	17,5-19,0	8,0-10,0	0,1

Tabla 3: Composición química en %wt. de material original [16] y materiales similares candidatos [17]. Los valores son máximos excepto en donde se indican rangos.

Una vez recopilada la información del material original se observa de la **Tabla 4** que la propiedad $R_{p0,2}$ se encuentra completa pero la propiedad UTS debe completarse, por lo que según el **Camino 2.2.** se deben buscar materiales similares de los cuales obtener información complementaria, procediendo al **Paso 3.**

Propiedad	Temperatura [°C]								
	25	50	100	150	200	250	300	350	400
$R_{p0,2}$ [MPa]	185	175	155	140	127	118	110	104	98
UTS [MPa]	500	-	-	-	-	-	-	-	-
E [GPa]	200	-	194	-	186	-	179	-	172
δ [kg/m ³]	7900								
ET [10 ⁻⁶ mm/mm°C]	-	-	16,0	-	17,0	-	17,0	-	18,0
CT [W/m.°C]	15	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4: Valores mínimos exigidos de propiedades obtenidas de la norma DIN 17440 emitida en el año 1972, para el material X5 CrNi 18 9 [16].

Teniendo en cuenta el tipo de componente aquí analizado, se comenzó la búsqueda en el código ASME, de aquellas especificaciones que describen la fabricación de productos semi-elaborados de geometría cercana al mismo. Además, dado que el material X5 CrNi 18 9 pertenece al grupo de aleaciones inoxidables austeníticas, se limitó la búsqueda a aquellas especificaciones que involucran a este tipo de materiales. De esta manera, a partir de la composición química del material original, se encontró en la especificación SA-479 que los materiales 304L y 302 son similares al original (ver **Tabla 3**) [17]. Dado que estos materiales pertenecen al código ASME BPVC, se tomaron de la sección II D del mismo, las propiedades plásticas de ambos en todo el rango de temperaturas y se procedió al **Paso 4** para elegir el material similar más adecuado con el cual completar la propiedad faltante. Teniendo en cuenta que se conocen datos de alta temperatura para la propiedad $R_{p0,2}$ pero no así para la propiedad UTS, se debió seguir el **Camino 4.2.**, para lo cual luego de haber aplicado el programa selectfi4.m a los datos recopilados de cada material similar y haber corregido las curvas de tendencia resultantes al valor de baja temperatura del material original, se obtuvieron los valores de alta temperatura con el cual comparar con el material original, que para este caso es el valor correspondiente a la temperatura de 350 °C. En la **Tabla 5** se muestran los parámetros calculados para ambos materiales similares y en la **Fig. 8 (a)** se muestran las curvas de tendencia de ambos materiales similares.

Material	$d_{R_{p0,2}}$
SA-479 340L	11,1 %
SA-479 302	-2,9 %

Tabla 5: Parámetros de metodología calculados para materiales similares.

A partir de la **Tabla 5** se observa que el material SA-479 302 resulta ser, según el criterio de diferencias relativas, el más adecuado con el cual completar la propiedad UTS del material original. Por lo tanto, se creó una curva de tendencia de la propiedad UTS a partir de los datos recopilados de este material con el programa selectfit4.m y se corrigió al valor conocido de baja temperatura del material original. Con esta tendencia corregida, mostrada en la **Fig. 8 (b)**, se completaron los valores faltantes de la propiedad UTS. En la **Tabla 6** se muestran los resultados de la aplicación de la metodología de estimación de propiedades plásticas al material X5 CrNi 18 9.

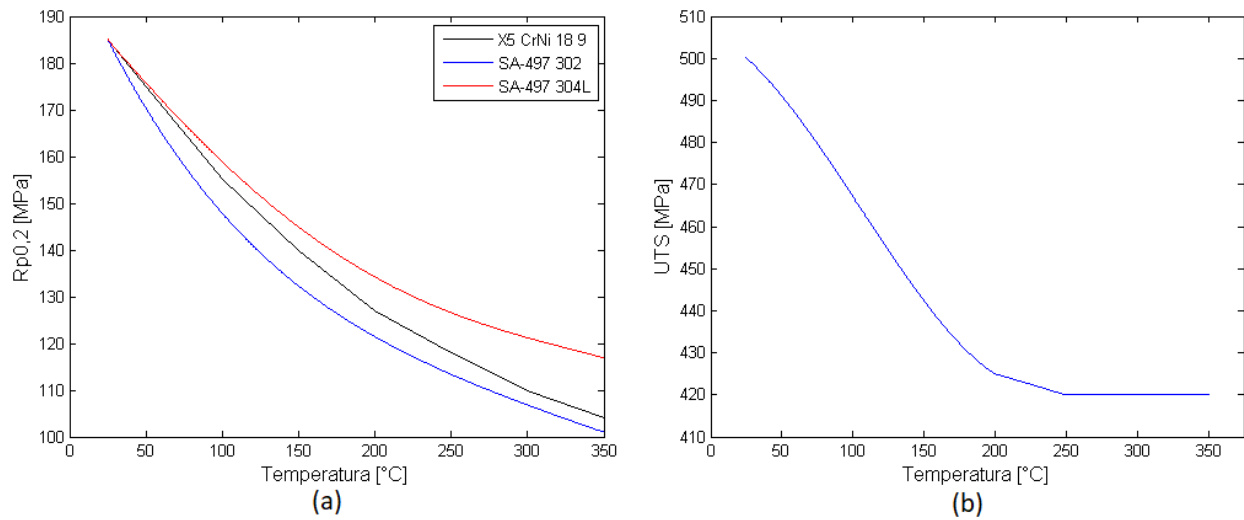


Fig. 8: Curvas de tendencia de propiedades $R_{p0.2}$ (a) y UTS (b), de material original y materiales similares. En el **Anexo B** se muestran los coeficientes de las funciones de aproximación de estas curvas.

Propiedad	Temperatura [°C]								Referencia
	25	50	100	150	200	250	300	350	
$R_{p0.2}$ [MPa]	185	175	155	140	127	118	110	104	DIN 17440 (1972)
UTS [MPa]	500	489	468	439	425	420	420	420	Valor a 25 °C de DIN 17440 y tendencia SA-479 302

Tabla 6: Resultado de la metodología de propiedades plásticas aplicada a bulones de cabeza hexagonal de material X5 CrNi 18 9.

3.1.2. Estimación de propiedades elásticas y físicas (X5 CrNi 18 9)

Una vez completa la metodología de estimación de propiedades plásticas, se procedió a resolver la asociada a las propiedades elásticas y físicas. Durante la recopilación de propiedades plásticas se obtuvieron también valores exigidos de propiedades elásticas y físicas para el material X5 CrNi 18 9, detalladas en la **Tabla 4**.

Comenzando con la resolución de la rigidez (E), en la tabla mencionada se observa que se han obtenido valores en todo el rango de temperaturas (25 a 400 °C) y bien espaciados. Por lo tanto, se siguió el **Camino 2.1.** para completar los valores faltantes, al crear una curva de tendencia que aproxime estos datos. En la **Tabla 1** del **Anexo B** se muestran los coeficientes del polinomio de aproximación a estos datos. Con esta curva se interpolaron los valores a las temperaturas faltantes y con ellos se completó la **Tabla 4**. Para la densidad (δ) también se siguió el camino antes mencionado, aunque no fue necesario generar una curva de tendencia, ya que se considera constante en todo el rango de temperaturas.

Para la expansión térmica (ET) se consiguieron valores espaciados en temperatura en casi todo el rango (ver **Tabla 4**). Sin embargo, no se cuenta con un valor a baja temperatura, con lo que no es posible crear una función de interpolación. Es por esto que para completar los valores faltantes se siguió el **Camino 2.2.** de la metodología. Una situación similar se observa para la conductividad térmica (CT), de la que sólo se conoce un dato a 25 °C. Es por esto que se tomó del código ASME BPVC II D [13] los valores de los grupos de materiales que mejor aproximan a los exigidos para ambas propiedades y con ellos se completó la **Tabla 4**.

Finalmente, del módulo de Poisson (ν) y la difusividad térmica (DT) no se consiguieron valores de las fuentes consultadas del material original, con lo que para completar sus valores, se procedió al **Camino 2.3**. De esta manera se comparó la composición química del material

X5 CrNi 18 9 con los distintos grupos mencionados en el código ASME BPVC II D [13], y se tomaron los datos de estas propiedades de aquel grupo que mejor se aproxima en composición química al material original. Con la información recopilada de cada propiedad se armó la **Tabla 7** resultante.

Propiedad	Temperatura [°C]								Referencia
	25	50	100	150	200	250	300	350	
E [GPa]	200	198	194	190	186	183	179	175	DIN 17440 (1972)
δ [kg/m ³]	7900								
ν	0,31								ASME II (2015)
ET instantánea [10 ⁻⁶ mm/mm.°C]	15,3	16,0	17,0	17,8	18,4	18,8	19,1	19,3	ASME II (2015) Grupo 3 y valores de referencia de DIN 17440 (1972)
CT [W/m.°C]	14,1	14,6	15,4	16,1	16,8	17,6	18,3	19,0	ASME II (2015) Grupo K y valor de referencia de DIN 17440 (1972)
DT [10 ⁻⁶ m ² /s]	3,57	3,64	3,75	3,86	3,98	4,11	4,22	4,33	ASME II (2015) Grupo K
C [J/kg°C]	500	508	520	529	534	542	549	555	Calculado

Tabla 7: Resultado de la metodología de propiedades elásticas y físicas para los bulones de cabeza hexagonal de material X5 CrNi 18 9.

3.2. Carcasa espiral de bomba del circuito del moderador

3.2.1. Estimación de propiedades plásticas (G-X5 CrNiMnMoN 21 11)

Comenzando con la metodología para la obtención de propiedades plásticas, se revisaron los archivos almacenados en planta [18]. Allí se encontró una especificación de este componente (ver **Fig. 9**) en la que se indica que la carcasa se encuentra constituida por el material GX-5 CrNiMnMoN 21 11. En esta especificación se detallan valores mínimos de $R_{p0,2}$ y UTS exigidos a baja temperatura y valores de las mismas propiedades obtenidos mediante ensayos realizados a alta temperatura, mostrados en la **Tabla 8**. Además, se indica la composición química de este material obtenida a partir de ensayos sobre el mismo (ver **Tabla 9**).

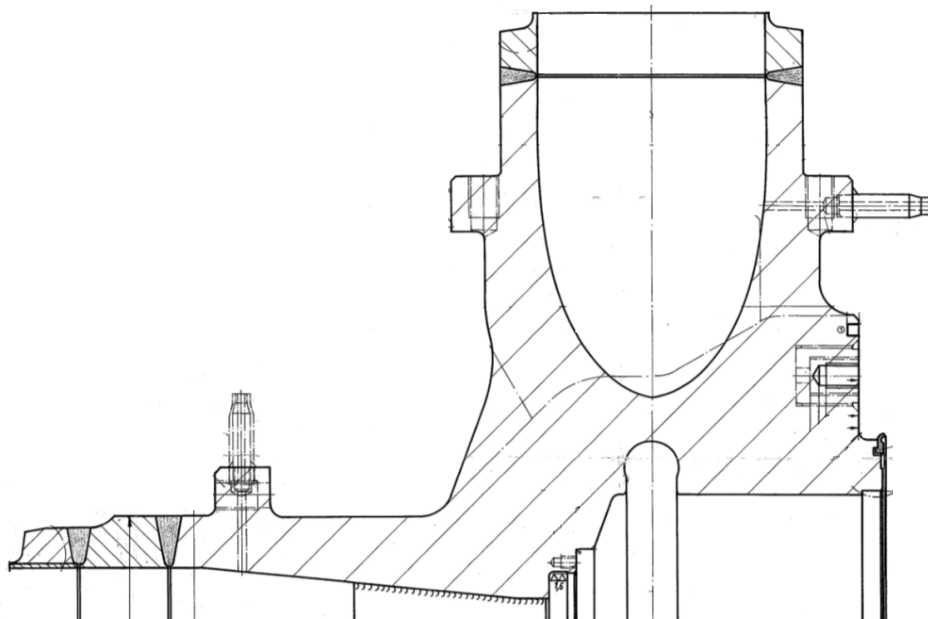


Fig. 9: Carcasa espiral de bomba centrífuga de material GX-5 CrNiMnMoN 21 11.

Temperatura [°C]	$R_{p0,2}$ [MPa]	UTS [MPa]
25	343	588
350	204	487

Tabla 8: Valores mínimos exigidos a baja temperatura y valores mínimos obtenidos mediante ensayos a alta temperatura [18].

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Nb
GX-5 CrNiMnMoN 21 11	0,043	0.59	2.80	0,024	0,006	23,1	10,0	2,32	0,28	0,11

Tabla 9: Composición química en %wt. de material GX-5 CrNiMnMoN 21 11 [18].

Dado que no se han encontrado valores mínimos requeridos a alta temperatura de ambas propiedades, para poder completar las mismas en todo el rango de temperatura se debió seguir el **Camino 2.3**. De esta manera, se realizó una penalización a partir de los valores de ensayos encontrados, sin la posibilidad de seleccionar un material similar. Tomando los valores mínimos requeridos a baja temperatura y los valores de ensayo a alta temperatura encontrados en la especificación mencionada, se construyó la **Tabla 10**, como resultado de esta metodología.

Propiedad	Temperatura [°C]								Referencia
	25	50	100	150	200	250	300	350	
$R_{p0,2}$ [MPa]	343	204	204	204	204	204	204	204	Valor de especificación y valor de certificado
UTS [MPa]	588	487	487	487	487	487	487	487	Valor de especificación y valor de certificado

Tabla 10: Resultado de la metodología de propiedades plásticas aplicada al componente carcasa espiral de bomba centrífuga de material GX-5 CrNiMnMoN 21 11.

3.2.2. Estimación de propiedades elásticas y físicas (G-X5 CrNiMnMoN 21 11)

Una vez obtenidas las propiedades plásticas, se procedió a completar la información de las propiedades elásticas y físicas, siguiendo la metodología descrita en la sección 2.2. Dado que no se hallaron valores de estas propiedades para el material original, se procedió a buscar en el código ASME datos de los mismos correspondientes al material más cercano en composición química, según indica el **Camino 2.3**. de la metodología antes mencionada. De esta manera se recopilamos los datos indicados en el código BPVC II D [13] y se armó la **Tabla 11**, en donde se indica el grupo de material a partir del cual se obtuvieron los valores de cada propiedad.

Propiedad	Temperatura [°C]								Referencia
	25	50	100	150	200	250	300	350	
E [GPa]	200	197	194	190	186	183	180	177	ASME II (2015) Grupo H
δ [kg/m³]	7830								ASME II (2015) Grupo Cast High Alloy Steel
ν	0,30								
ET instantánea [10 ⁻⁶ mm/mm.°C]	15,3	16,0	17,0	17,8	18,4	18,8	19,1	19,3	ASME II (2015) Grupo 3
CT [W/m.°C]	14,1	14,6	15,4	16,1	16,8	17,6	18,3	19,0	ASME II (2015) Grupo K
DT [10 ⁻⁶ m²/s]	3,57	3,64	3,75	3,86	3,98	4,11	4,22	4,33	
C [J/kg°C]	500	507	520	529	534	542	549	555	Calculado

Tabla 11: Resultado de la metodología de propiedades elásticas y físicas aplicada al componente carcasa espiral de bomba centrífuga de material GX5-CrNiMnMoN 21 11.

3.3. Tubo sin costura de intercambiador de calor

3.3.1. Estimación de propiedades plásticas (15 Mo 3)

Para comenzar la recopilación de datos de este componente, se buscó en archivos de planta de CNAI, en donde se encontró un plano en el que se indica que este componente (**Fig. 10**) se encuentra constituido por el material 15 Mo 3. Además, entre otros archivos se halló una especificación del componente en donde se detalla los requerimientos estipulados por el estándar DIN 17175-2 [19, 20]. En este estándar se especifican valores de algunas propiedades a varias temperaturas, excepto en el caso de la UTS, de la que se detalla únicamente un valor a baja temperatura. En las **Tablas 12** y **13** se muestran, según la norma antes mencionada, las propiedades plásticas y físicas de este material y la composición química, respectivamente.

Según la situación presentada en la **Tabla 12** se debe continuar con el **Camino 2.2**, de la metodología de estimación de propiedades plásticas, para completar el rango entre 25 a 200 °C para la propiedad $R_{p0,2}$ y el rango entre 25 y 350 °C para la propiedad UTS. Es así, que siguiendo el **Paso 3** se debió buscar materiales similares con los cuales completar estas propiedades.

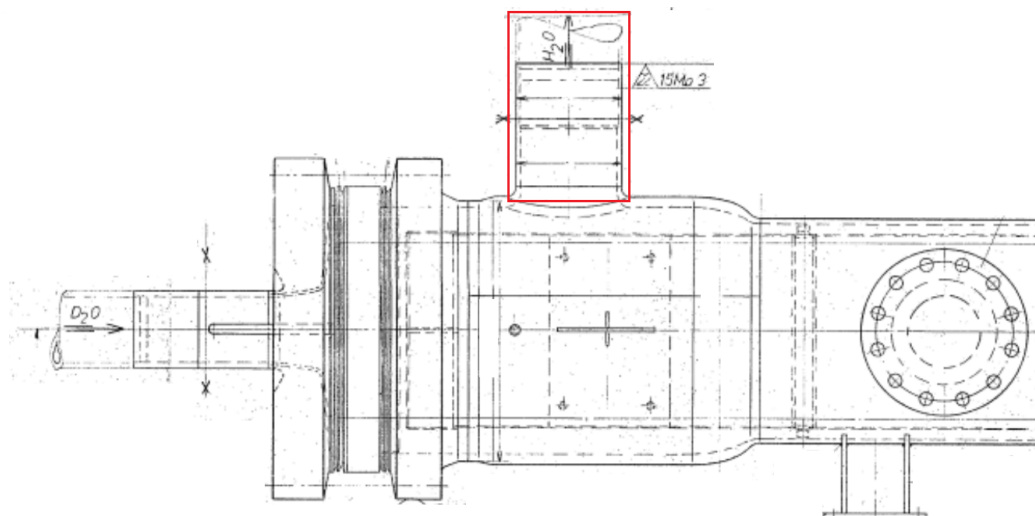


Fig. 10: Componente de tubería de material 15 Mo 3 (encuadrado en rojo).

Propiedad	Temperatura [°C]						
	25	100	200	250	300	350	400
$R_{p0,2}$ [MPa]	284	-	255	235	206	186	-
UTS [MPa]	441	-	-	-	-	-	-
E [GPa]	206	-	-	-	181	-	162
ET [$10^{-6}mm/mm^{\circ}C$]	-	11,1	12,1	-	12,9	-	13,5
CT [$W/m.^{\circ}C$]	49	48	46	-	44	-	41

Tabla 12: Valores mínimos exigidos de propiedades obtenidas a partir de la norma 17175-2 para el material 15 Mo 3 [20].

Teniendo en cuenta que el componente analizado en esta sección refiere a un tubo sin costura y, conociendo la composición química del 15 Mo 3, se buscaron en las especificaciones mencionadas en el código ASME BPVC II A 1 y 2 que involucran este tipo de producto, aquellos materiales que mejor aproximen la composición química del material original. De esta manera se encontraron los materiales 16 Mo 3 [21] y SA-209 T1, T1a y T1 b [22], cuyas composiciones químicas se muestran en la **Tabla 13**.

Una vez encontrados los materiales similares candidatos, se debió realizar la elección del más adecuado con el cual estimar las propiedades plásticas del material original.

Dado que, según la **Tabla 12**, se cuenta con un dato a alta temperatura para la propiedad $R_{p0,2}$ pero no así para la propiedad UTS, se aplicó el **Camino 4.2**. de la metodología. Para

Material	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	Al	Cu
15 Mo 3	0,12-0,20	0,15-0,35	0,50-0,80	0,040 máx.	0,040 máx.	0,25-0,35	-	-	-	-
16 Mo 3	0,12-0,20	≤ 0,35	0,40-0,90	0,025 máx.	0,020 máx.	0,25-0,35	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,040	≤ 0,30
SA-209 T1	0,10-0,20	0,10-0,50	0,30-0,80	0,025 máx.	0,025 máx.	0,44-0,65	-	-	-	-
SA-209 T1a	0,15-0,50	0,10-0,50	0,30-0,80	0,025 máx.	0,025 máx.	0,44-0,65	-	-	-	-
SA-209 T1b	0,14 máx.	0,10-0,50	0,30-0,80	0,025 máx.	0,025 máx.	0,44-0,65	-	-	-	-

Tabla 13: Composición química en %wt. de tubo sin costura de intercambiador de calor [20] y de materiales similares candidatos [22, 21].

esto primero se debieron tomar del código ASME BPVC II D, los valores de la propiedad $R_{p0,2}$ pertenecientes a los materiales candidatos mencionados. A estos valores se les aplicó el programa selectfit4.m para armar las curvas de aproximación a los mismos. Estas curvas fueron corregidas al valor conocido de baja temperatura del material 15 Mo 3, de manera de obtener el valor de alta temperatura con el cual se realizó el cálculo de los parámetros de la metodología, que para este caso corresponde a la temperatura 200 °C. En la **Tabla 3** del **Anexo B** se muestran los coeficientes de los polinomios de aproximación a los valores de los materiales similares considerados.

En la **Fig. 11** se muestran las curvas de tendencia mencionadas de la propiedad $R_{p0,2}$ junto con los valores mínimos exigidos encontrados para el material original. En ella se observa que a partir de los 200 °C, el comportamiento de la propiedad del material original comienza a desviarse respecto de los materiales similares. Esto se atribuye a que los materiales candidatos propuestos poseen una mayor cantidad de elementos aleantes (Mo y Cr), que el material original, que evitan la disminución de la resistencia plástica a altas temperaturas (ver **Tabla 13**). Sin embargo, debido a que este componente pertenece al sistema de alimentación de agua, su temperatura máxima de operación es de 150 °C, y aún así, los valores para temperaturas mayores a 200 °C no necesitan estimarse, ya que son conocidos.

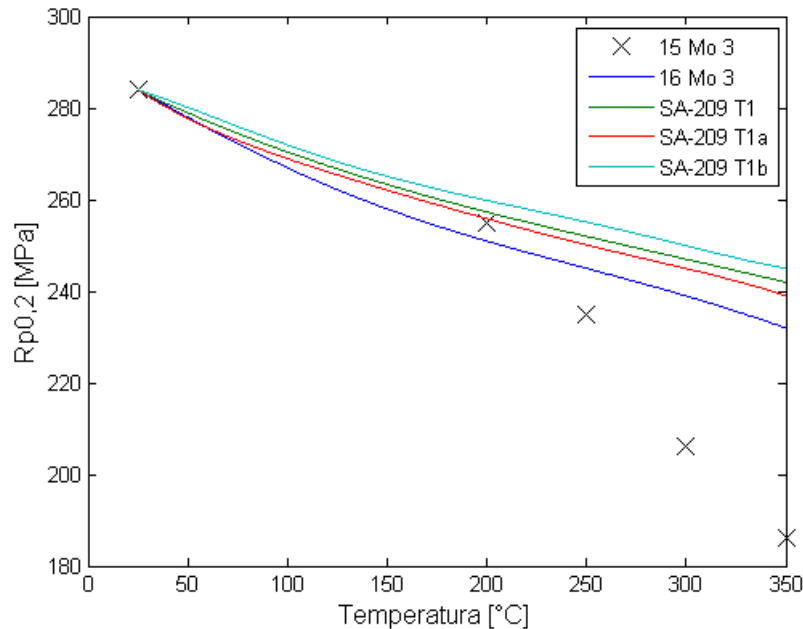


Fig. 11: Curvas de tendencia de la propiedad $R_{p0,2}$ de cada material similar candidato y corregidas al valor de baja temperatura del material 15 Mo 3, junto con el valor mínimo requerido de alta temperatura.

Siguiendo el **Camino 4.2**, se calcularon los parámetros $d_{Rp0,2}$ para cada material similar, los cuales son mostrados en la **Tabla 14**. A pesar de que el material SA-209 T1a resulta tener el menor valor absoluto del parámetro, se prioriza que el parámetro del material 16 Mo 3 resulta ser negativo y menor al 7,5 %. Es por esto que se eligió su tendencia para completar los valores de las propiedades del material original.

Material	16 Mo 3	SA-209 T1	SA-209 T1a	SA-209 T1b
$d_{Rp0,2}$	-1,4 %	0,9 %	0,5 %	2,0 %

Tabla 14: Parámetros de metodología calculados para materiales similares.

Una vez definido el mejor material similar se procedió a completar las propiedades del material original según lo indica el **Paso 5**. En la **Fig. 12** se muestran los valores obtenidos al aplicar las funciones de aproximación en rojo y los valores del material original en azul, para ambas propiedades. Con estos mismos valores se construyó la **Tabla 15**.

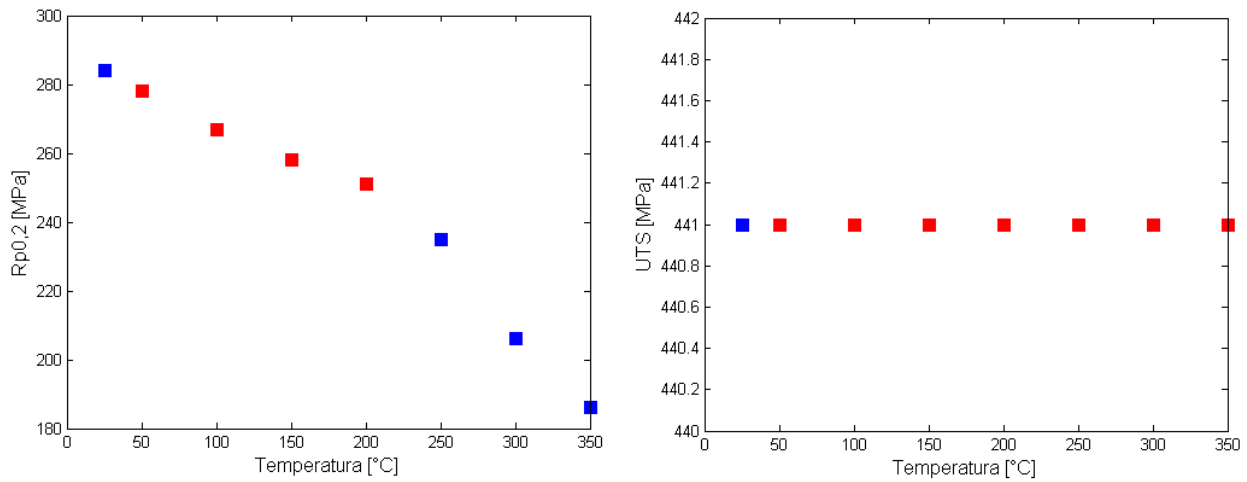


Fig. 12: Valores del material original 15 Mo 3 (azul) y de tendencia (rojo) para las propiedades $R_{p0,2}$ (izquierda) y UTS (derecha).

Propiedad	Temperatura [°C]								Referencia
	25	50	100	150	200	250	300	350	
$R_{p0,2}$ [MPa]	284	278	267	258	251	235	206	186	Valores DIN 17175-2 y tendencia 16 Mo 3
UTS [MPa]	441	441	441	441	441	441	441	441	Valor DIN 17175-2 y tendencia 16 Mo 3

Tabla 15: Resultado de la metodología de propiedades plásticas aplicada al componente tubo sin costura de intercambiador de calor de material 15 Mo 3.

3.3.2. Estimación de propiedades elásticas y físicas (15 Mo 3)

Una vez completa la metodología de propiedades plásticas se procedió a recopilar información de las propiedades elásticas y físicas. En la **Tabla 12** se muestran los valores de las propiedades elásticas y físicas mencionadas en la norma DIN 17175-2 para el material 15 Mo 3.

Para la rigidez (E) se conocen algunos valores espaciados en temperatura pero no resultan suficientes para poder construir una curva de interpolación con la cual completar la propiedad en todo el rango de temperaturas. Es por esto que siguiendo el **Camino 2.2.**, se necesitó encontrar un material ASME que mejor aproxime los datos conocidos del material original. De

esta manera, buscando en el código ASME BPVC II D [13] se tomaron los valores del grupo de materiales A y se completó todo el rango de temperaturas con los mismos.

Para la expansión térmica (ET), a pesar de que se cuenta con varios valores a alta temperatura, no se conocen a baja temperatura con lo que no fue posible construir una curva de tendencia aplicando los valores obtenidos a partir del estándar [20]. Por esta razón, se decidió actuar de la misma manera que para la rigidez, y se buscó aquel material del código ASME II D cuyos valores de esta propiedad mejor coincidieran con las del material original. De esta manera se encontró que el grupo 8Ni-9Ni, es el más óptimo para completar la tendencia.

De la conductividad térmica (CT) se cuenta con varios datos en todo el rango de temperaturas (ver **Tabla 12**), con lo que se siguió el **Camino 2.1.**. Así, se armó una curva de aproximación al aplicar el programa selectfit4.m a los datos obtenidos de la norma mencionada. Con esta curva se completaron los valores faltantes al interpolar en las temperaturas correspondientes. En la **Tabla 3** del **Anexo B** se muestran los coeficientes del polinomio de aproximación utilizado.

Para la densidad (δ), el módulo de Poisson (ν) y la difusividad térmica (DT) no se encontraron datos del material original, con lo que siguiendo el **Camino 2.3.** se buscó el mejor grupo de material que mejor aproximara la composición química del 15 Mo 3. Así, se encontró que para las dos primeras el grupo de aceros de baja aleación mejor coinciden con este material, mientras que para la última lo hace el Grupo B.

En la **Tabla 16** se muestran los resultados de cada propiedad mencionada junto con la referencia de donde se obtuvieron los mismos.

Propiedad	Temperatura [°C]								Referencia
	25	50	100	150	200	250	300	350	
E [GPa]	200	199	196	193	190	187	183	177	ASME II (2015) Grupo A y valores DIN 17175-2
δ [kg/m³]	7750								ASME II (2015) Grupo Low Alloy Steel
ν	0,30								
ET instantánea [10 ⁻⁶ mm/mm.°C]	9,9	10,5	11,1	12,2	12,6	12,8	12,9	13,2	ASME II (2015) Grupo 8Ni-9Ni
CT [W/m.°C]	49	48,6	48,0	47,1	46,0	45,0	44,0	42,5	Tendencia 15Mo3 y valores DIN 17175-2
DT [10 ⁻⁶ m²/s]	13,7	13,2	12,5	11,7	11,05	10,4	9,8	9,2	ASME II (2015) Grupo B
C [J/kg°C]	461	475	495	519	537	558	579	596	Calculado

Tabla 16: Resultado de la metodología de propiedades elásticas y físicas aplicada al componente tubo sin costura de intercambiador de calor de material 15 Mo 3.

4. Conclusiones

Como conclusión de esta primera parte, se puede afirmar que se ha logrado estandarizar la recopilación y estimación de propiedades de materiales de los componentes de la Central Nuclear Atucha I mediante la elaboración de dos metodologías. Durante el desarrollo de las mismas, se ha adquirido conocimiento en el manejo de documentación técnica de diseño y fabricación de componentes de centrales nucleares. Además, se han empleado herramientas de análisis estadístico para automatizar el tratamiento de la información adquirida durante la utilización de estas metodologías, al crear programas en el lenguaje MATLAB.

Mediante la aplicación de las metodologías se ha completado la información de las propiedades plásticas, elásticas y físicas de algunos materiales de componentes de CNAI, necesarias para la revalidación de los TLAAs.

Durante el análisis realizado en esta parte del trabajo, se ha confirmado el concepto de que no se puede separar la composición química de un material, de la historia termomecánica del componente que conforma, al momento de estudiar el comportamiento de las propiedades plásticas a varias temperaturas. Esto se ha evidenciado al comparar materiales con composiciones químicas semejantes que han demostrado desviaciones en el comportamiento de sus propiedades.

Por otro lado, se ha evidenciado cómo varían los requerimientos mecánicos de las normas de los materiales empleados en el diseño de la central (50 años de antigüedad), contra materiales fabricados actualmente bajo la misma designación o el mismo estándar. Se ha notado en ciertos casos que sus composiciones han sido modificadas para atender necesidades a altas temperaturas, como es el caso del 15 Mo 3 tratado en este trabajo, cuya versión actual contiene elementos no presentes en su versión anterior, con los cuales se obtiene una resistencia a la degradación de sus propiedades plásticas superiores a alta temperatura.

Para la adquisición y estimación de propiedades elásticas y físicas, se ha empleado la versión 2015 del código ASME BPVC. Con el mismo, se ha logrado definir estas propiedades para algunos materiales, como lo requieren los modelos termomecánicos aplicados en los TLAAs de CNAI.

Finalmente, el alcance de las metodologías desarrolladas en este trabajo permiten cubrir la mayoría de los casos que han de encontrarse, durante el análisis de la información presente en los archivos de NA-SA. Sin embargo, aún quedan situaciones que no pueden ser resueltas por estas metodologías, como es el caso de aquellos componentes de cuyos materiales no sea posible adquirir su composición química, o el caso en que no se conozca un valor exigido a baja temperatura de una de las propiedades plásticas.

MITIGACIÓN DE UN ACCIDENTE SEVERO EN CNAI

1. Dispositivo contenedor de Núcleo Fundido

Como se mencionó en la sección 2 de la **Parte I**, en este trabajo se propondrá un diseño y materiales de construcción de un dispositivo con el cual se mitigarían los efectos de un accidente severo postulado en la Central Nuclear Atucha I.

Para poder establecer las características que debe cumplir este dispositivo es necesario conocer el desarrollo de los eventos que se desencadenan en un accidente severo y los elementos constructivos involucrados en este accidente, de una central nuclear del tipo PHWR como Atucha I, junto con las bases del funcionamiento de esta central.

1.1. Funcionamiento de un reactor tipo PHWR (CNAI)

En un reactor nuclear de potencia del tipo PHWR, un núcleo, formado por varias columnas de combustible de Zircaloy-4 (250 para CNAI) con 37 barras de combustible de dióxido de uranio (U_2O) natural cada una, es utilizado como fuente de calor. Estas columnas son incorporadas dentro los canales de refrigeración por donde circula el refrigerante, compuesto de agua pesada (D_2O), con el cual se evacua el calor generado por el núcleo. El refrigerante es direccionado hacia el generador de vapor, en donde mediante el uso de intercambiadores de calor se evapora el agua de otro circuito independiente al de refrigeración, que al alcanzar las turbinas generadoras se vuelve a precipitar mediante el intercambio de calor con otra fuente de agua fría [1]. Este circuito es resumido en la **Fig. 1**.

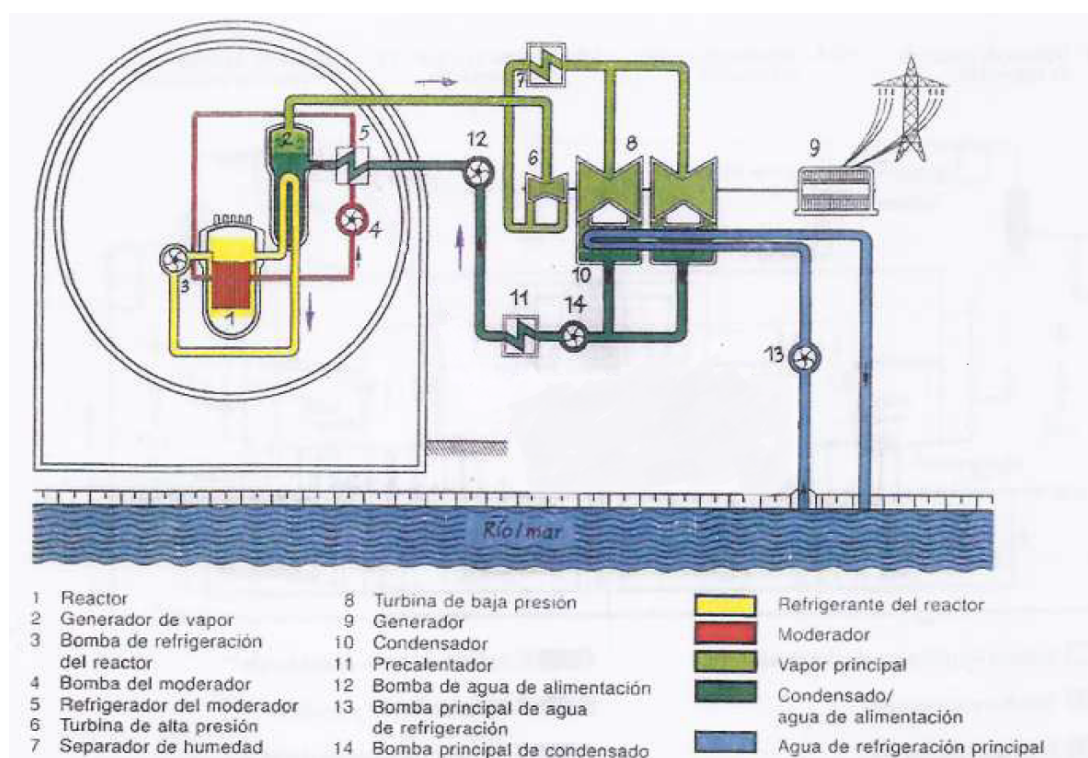


Fig. 1: Diagrama simplificado de elementos de una central tipo PHWR [1].

Para que las reacciones nucleares que generan el calor en el núcleo del reactor puedan llevarse a cabo, es necesario que cada uno de los elementos combustibles se encuentren rodeados por

un moderador de agua pesada, que disminuye la energía de los neutrones para aumentar la sección eficaz de interacción con el uranio natural. Esta agua se encuentra contenida dentro del tanque del moderador y es mantenida a una temperatura menor que la del refrigerante, mediante su circulación por el circuito del moderador. El tanque moderador junto con el núcleo en su interior se encuentran envueltos por el recipiente de presión, como se muestra en la **Fig. 2**. Este recipiente se encuentra constituido por semiesferas de acero en las partes superior e inferior, rellenas por piezas de acero, para economizar el uso de moderador, que jugarán un papel importante durante el desarrollo del accidente severo. A su vez, tanto el recipiente de presión como el generador de vapor están rodeados por una esfera de concreto y acero que aísla a estos sistemas del ambiente que los rodea, denominada esfera de contención. El dispositivo presentado en este trabajo tiene como objetivo evitar el escape del material del núcleo hacia afuera de esta contención.

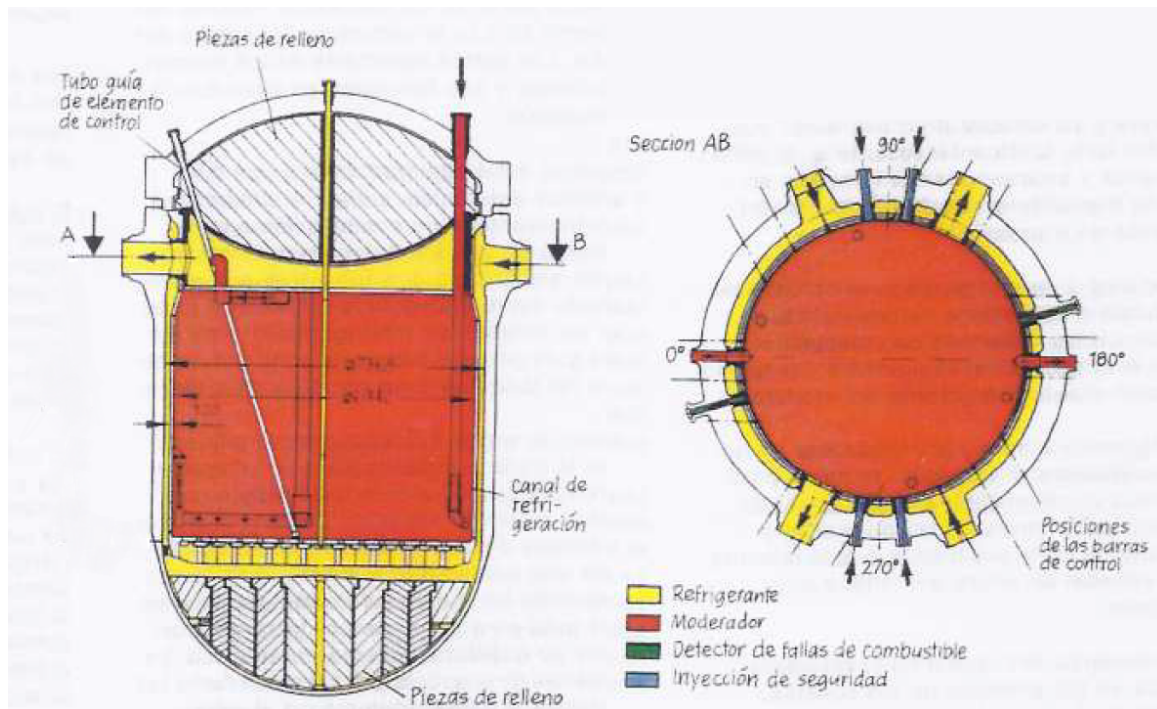


Fig. 2: Recipiente de presión del reactor Atucha II, similar al del reactor Atucha I [1].

1.2. Accidente Severo

A partir del Programa de Gestión de Accidentes Severos para CNAI, se identifican los eventos causantes que podrían desencadenar en una condición de extensión de diseño con fusión del núcleo, denominada accidente severo. Es por la baja probabilidad de ocurrencia de estas condiciones que, los diseños de las centrales nucleares no contaban con una contra medida para resolver los efectos de este tipo de accidentes. Sin embargo, a partir de la experiencia adquirida con los eventos desencadenados en las centrales de Three Mile Island [23] y Fukushima [24], se considera que las centrales nucleares que en la actualidad se encuentran en funcionamiento deben contar con una manera de mitigar los efectos de este tipo de accidentes.

Teniendo en cuenta las similitudes entre CNAI y un reactor tipo Pressurized Water Reactor (PWR), la secuencia de eventos que desencadenarían en un accidente severo pueden estudiarse desde el punto de vista de un reactor PWR, para luego extrapolarlo al caso particular de CNAI. Es así que, en el caso en que se produzca una condición accidental y no pueda detenerse el escalamiento en el daño del núcleo hasta alcanzar una fusión total del mismo, se pueden identificar cinco fases del proceso [25]:

1. Desde el inicio del accidente hasta el comienzo de la degradación del núcleo.
2. Pérdida de la geometría del núcleo y relocalización en el fondo del tanque del moderador.
3. Relocalización del material fundido en el plenum inferior del recipiente de presión (RPV).
4. Interacción del material fundido con la pared del RPV hasta su falla.
5. Procesos fuera del RPV.

Las primeras cuatro etapas se denominan procesos “In-Vessel” debido a que ocurren dentro del RPV, mientras que a partir de la cuarta, el núcleo fundido (corium) es trasladado por gravedad hacia afuera del recipiente, y los fenómenos que ocurren ya no se encuentran influenciados por las características del mismo, con lo que pasan a denominarse “Ex-Vessel”. Dependiendo de la naturaleza del accidente y de la respuesta de los sistemas de seguridad de la central, el evento puede finalizar en un proceso “In o Ex-Vessel”. El dispositivo que en este trabajo se describe tratará, el caso de un accidente severo de característica “Ex-Vessel”.

1.2.1. Accidente severo “Ex-Vessel” en reactores PWR

En un reactor tipo PWR es posible listar los fenómenos que puedan ocurrir durante el progreso del accidente “Ex-Vessel”, los cuales estarán influenciados por las características de los eventos iniciantes y por el diseño de la central. A continuación se resumirán los diferentes caminos que pueda tomar el accidente, referenciándose al diagrama mostrado en la **Fig. 4**.

Una vez que el material fundido provocara la falla del RPV, como se muestra en la **Fig. 3**, el corium se derramaría hacia la contención de concreto del reactor. Dependiendo de la naturaleza del accidente, es decir, de la magnitud del daño al núcleo y características de falla del RPV, entre otros, el derrame del corium puede ser continuo o puede derramarse en intervalos. En caso en que el RPV se encuentre presurizado durante su falla, el material fundido escaparía el recipiente en forma de jet a alta velocidad, en lugar de ser gobernado por la gravedad.

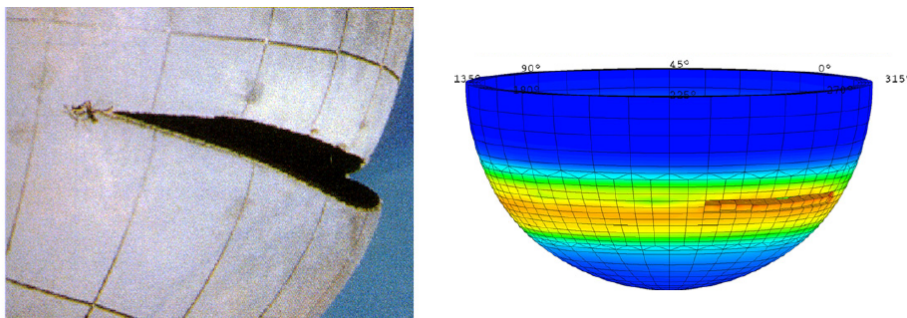


Fig. 3: Simulación de falla de sección inferior de un RPV de reactor tipo PWR durante accidente severo [26].

Dependiendo de la serie de eventos que desencadenaron el accidente severo, puede suceder que debajo del RPV se encuentre refrigerante acumulado, como es el caso de un accidente del tipo Loss of Coolant Accident (LOCA). De ser así, en el momento en el que el corium entra en contacto con el refrigerante, ocurriría una explosión de vapor debida a la rápida expansión del agua provocada por su calentamiento abrupto al recibir el calor de la masa fundida, provocando una falla temprana de la contención. Este tipo de falla podría suceder aún cuando el corium se derrame en forma intermitente, no siendo capaz de provocar una explosión de vapor, pero aumentando la presión en la contención por formación de vapor con cada caída de la masa fundida hacia la pileta de refrigerante. En ambos casos, el corium sería expulsado en varias direcciones en forma de partículas de pequeño tamaño, con lo que se aceleraría el enfriamiento del mismo.

En el momento en que el corium entra en contacto con el concreto de la contención del reactor debajo del RPV, comienza un fenómeno denominado Molten Corium-Concrete Interaction (MCCI). Una vez que el material fundido se encuentra esparcido sobre la contención, dependiendo del diseño de la central como es el caso de los reactores European Pressurized Reactor (EPR) [27], Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) [28] y el Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR) [29] es posible inundar la cavidad de la contención con el objeto de evacuar la energía calórica emitida por el corium, y de esta manera, disminuir los efectos del MCCI.

Tanto en el caso en el que el agua aportada por los sistemas de seguridad no alcance para disminuir la temperatura del corium hasta una temperatura en la que cese la interacción entre el corium y el concreto, como en el caso en el que la planta no cuente con este sistema de seguridad, el material fundido se encontraría en directo contacto con el concreto de la contención. De esta manera, el fenómeno MCCI se encontraría activado produciéndose una fusión del concreto y disminuyendo el espesor de la contención con el avance del corium. Dependiendo del diseño del reactor y de las características del accidente, el material fundido podría perforar la contención posibilitando el escape de material radiactivo hacia el exterior de la planta. Además, debido a la degradación del concreto, se generarían gases no condensables que podrían provocar una sobrepresurización de la contención, resultando en una falla de la misma, o incluso gases combustibles que pudieran causar una explosión.

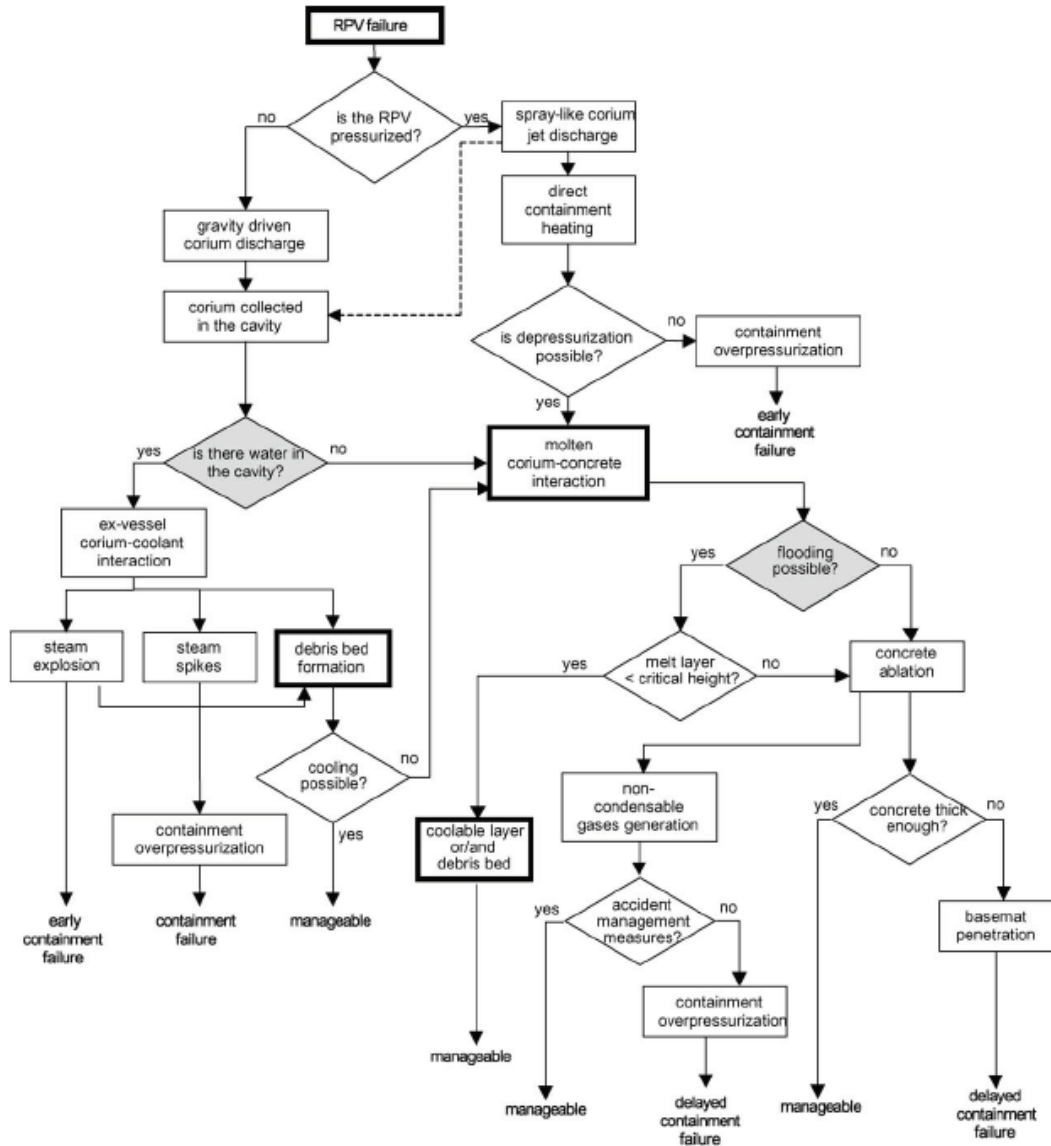


Fig. 4: Secuencia de caminos ocurrientes durante un accidente severo "Ex-Vessel" [30].

1.2.2. Accidente severo “Ex-Vessel” postulado en Atucha I

Tanto las características del accidente como el diseño del reactor definen las propiedades fisicoquímicas del corium, como son las especies químicas que lo componen, sus cantidades y proporciones y la temperatura con la que la masa fundida se derramaría desde el RPV. Es por esto que, para poder estimar la magnitud de los efectos de un accidente severo, se deben conocer los eventos que desencadenarían el accidente y terminarían con el derrame del corium fuera del recipiente de presión, como se comentó en la sección anterior.

Durante este trabajo, siguiendo los análisis realizados por NA-SA, se presupone el desarrollo de eventos que llevan a la falla o falta de alguno de los sistemas de seguridad demandados para la mitigación del accidente, como puede ser la pérdida de refrigerante sin posibilidad de reposición, fallas humanas, o situaciones extremas como la pérdida total de suministro eléctrico debido a catástrofes naturales (terremotos, inundaciones, etc.), intencionales o accidentales (explosiones, accidentes aéreos, etc.). De esta manera, para estudiar las consecuencias de un accidente severo y tomando un criterio conservador, se supone la fusión completa del núcleo del reactor Atucha I, junto con la falla del tanque del moderador y del recipiente de presión, a partir de una modalidad de desprendimiento de la semiesfera inferior incluyendo el cuerpo de relleno, compuesto por anillos concéntricos de acero [25].

Una vez planteada la severidad del accidente y las características de la interacción entre el material fundido y los sistemas mencionados en el párrafo anterior, es posible calcular el aporte de cada uno de estos a la masa del corium. Realizando un análisis de los materiales involucrados en cada uno de los componentes de los sistemas (elemento combustible, barra combustible, canal combustible y tanque moderador) del núcleo de Atucha I, se obtiene una masa de 136 t compuesta de material cerámico (UO_2) y material metálico (Zircaloy-4, acero inoxidable e Inconel), equivalente a un volumen de 20 m^3 [25].

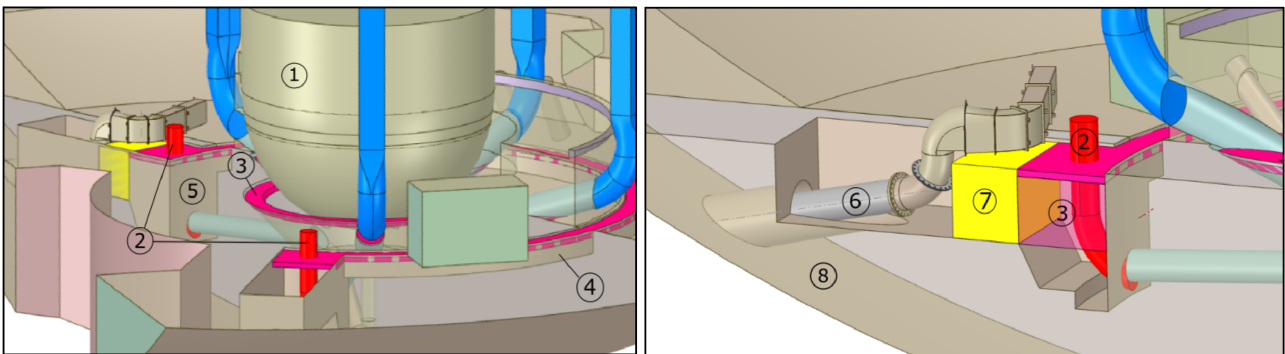


Fig. 5: Vistas de la contención del reactor de Atucha I. Se listan elementos constructivos y relevantes: 1) RPV, 2) cañerías de conexión cavidad-sumidero (cuernos), 3) corium, 4) canalización 5) trincheras 6) cañerías de bomba TJ, 7) barrera de anti-derrame, 8) contención. Imágenes pertenecientes a los autores de [25].

Si se considera que todo este material se deposita fundido sobre la cavidad de concreto de la contención, luego de derramarse desde el RPV, el corium se adentraría en unas cañerías (“cuernos”) utilizadas para evacuar el refrigerante descargado en la cavidad en caso de accidentes con pérdida de refrigerante, que interconectan la cavidad del reactor con el sumidero y se muestran en la **Fig. 5** detalladas con el ítem 2. Debido a la alta temperatura del corium, estas cañerías compuestas por material metálico, rápidamente fallarían y el material fundido se depositaría sobre una canalización que desembocan en las trincheras del sumidero, detallados con los ítems 4 y 5 respectivamente (**Fig. 5**). Una vez depositado en el sumidero, el corium se escurriría por otro set de cañerías pertenecientes a bombas denominadas TJ, detallados con el ítem 6 (**Fig. 5**), que al fallar por alta temperatura, permitirían el escape del material fundido hacia afuera de la contención. De manera de evitar esta situación, en este trabajo se plantea la construcción de una barrera (indicada como 7 en la **Fig. 5**) que impida la salida de material radiactivo hacia afuera de la contención, manteniendo el corium en su interior durante un período de tiempo

que permita su solidificación o, en su defecto, retrase su escape permitiendo el accionar del personal de planta, asegurando su resguardo.

1.3. Molten Corium Concrete Interaction (MCCI)

Como se explicó en la sección anterior, una vez que el recipiente de presión falla por interacción con el material del núcleo fundido, el corium se derrama sobre la cavidad del reactor y escurre rápidamente hacia las trincheras y canalizaciones de la contención de concreto.

Este corium, compuesto por UO_2 , ZrO_2 , Zr, Fe, Cr, Ni y otros metales, se manifiesta como una masa líquida estratificada en dos capas: una mezcla pesada de materiales cerámicos que se distribuye sobre la parte inferior del volumen, y otra capa metálica más liviana, ubicada sobre la parte superior. Toda esta masa, compuesta en mayor parte por UO_2 , puede encontrarse a temperaturas mayores a los 2500 °C. Esto se debe a que la temperatura de fusión del material combustible se encuentra en esos órdenes, pero además porque debido al decaimiento residual del uranio, el material libera energía en forma de radiación que es reabsorbida como calor por el mismo, aportando al aumento de temperatura [30].

A esta temperatura el corium entrega calor al concreto de la contención del reactor por radiación y convección, elevando la temperatura del concreto hasta producir su degradación. La misma es consecuencia de varias transformaciones que sufre el concreto durante su calentamiento, como son, la evaporación de agua libre y de constitución que produce un aumento en la presión interna del concreto, generando porosidad y hasta desprendimiento de material (spalling), el cual es autosostenido debido al constante contacto del corium con concreto fresco; descomposición de los constituyentes del concreto como el CaCO_3 en CaO y CO_2 , disminuyendo su capacidad mecánica y; la fusión del concreto a temperaturas cercanas a los 1200 °C. Los productos no condensables liberados por la degradación del concreto, reaccionan con la fase metálica del corium, oxidando a sus componentes. Estas reacciones de oxidación son altamente exotérmicas y contribuyen al aumento de la temperatura del corium, y esto a su vez a la degradación del concreto. A modo de ejemplo se considera la reacción de un mol de Zr con dos moles de H_2O o CO_2 que libera 600 kJ de energía calórica. Todo esto promueve la agitación de la masa fundida, por el movimiento de los gases liberados dentro del fluido y por el transporte de la fase metálica hacia la fase oxidica por su oxidación, que a su vez aumenta la cinética de degradación del concreto. En la **Fig. 6** se resume el fenómeno de MCCI.

Debido a la baja conductividad térmica del concreto, la mayor parte del calor aportado por el corium es utilizado para su fusión. Además, en la interfase entre concreto y corium, puede generarse una corteza sólida de corium, que es permeable a los gases del concreto y disminuye la transferencia de calor tanto entre el corium y el concreto como entre el corium y la atmósfera [31].

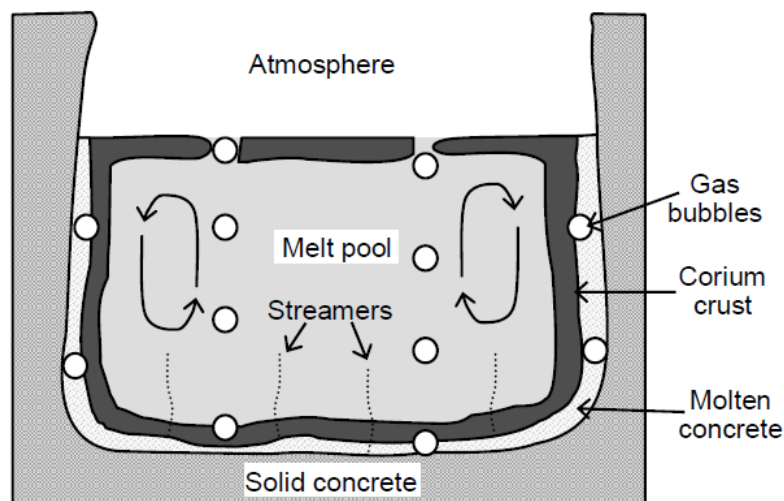


Fig. 6: Fenómeno de MCCI [31].

En conjunto a la degradación térmica, el corium interactúa con el concreto a partir de su disolución en su fase cerámica. La incorporación del concreto a esta fase produce una disminución en las temperaturas de sólidos y líquidos del corium, lo que lleva a una separación entre ambas de alrededor de 1000 K, como se muestra en la **Fig. 7**. Esto dificulta la tarea de solidificar el corium para su contención ya que continuará fluyendo hasta alcanzar una temperatura inferior a la de sólidos. Sin embargo, al aumentar la superficie por esparcimiento se acelera su enfriamiento. Además, con la incorporación de concreto a la fase oxídica del corium, su densidad disminuye hasta producirse una inversión de las fases (metálica y oxídica) generando un intenso mezclado entre ambas y disminuye la densidad de potencia de irradiación generada por el decaimiento residual del material del núcleo [30].

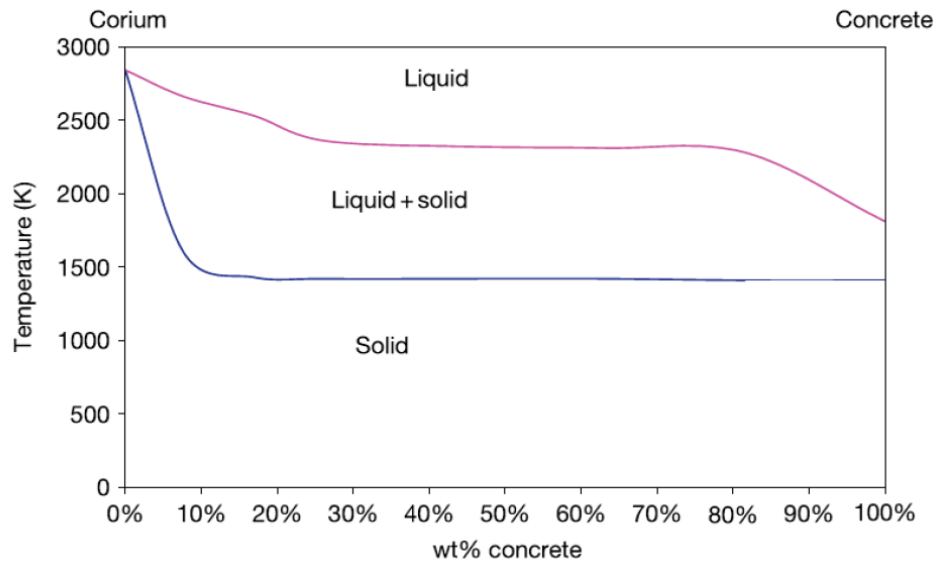


Fig. 7: Diagrama de fase corium-concreto calculado [30].

2. Mitigación de las consecuencias de un accidente severo

2.1. Core-catcher en reactores de agua liviana

Los diseños de los reactores contemporáneos de agua liviana, como son los reactores de tercera generación, cuentan con una solución al posible desarrollo de un accidente severo, cuyo propio diseño y funcionamiento depende del modelo de reactor al que pertenece y el modo de acción que toman frente al tratamiento del material fundido que surge como consecuencia del accidente. Independientemente de estas características, estos dispositivos se agrupan dentro de los denominados core-catchers. El objetivo de estos dispositivos es el de actuar como última medida ante la falla de sistemas de seguridad y proporcionar un medio con el cual se facilite la relocalización, retención y enfriamiento a largo plazo del corium, como manera de prevenir el daño a la contención.

Como se mencionó en la sección 1.2 de la **Parte III**, los procesos de un accidente severo pueden ser divididos en distintas etapas que ocurren de manera “In o Ex-Vessel”. De la misma manera, se han desarrollado core-catchers que apuntan a resolver esta problemática tanto dentro [32, 33, 34] como fuera del recipiente de presión, luego de su falla [27, 28, 29]. La filosofía detrás del funcionamiento de estos core-catchers se basa en dos conceptos que apuntan a evacuar el calor contenido y generado por el corium como manera de proteger de la degradación termoquímica a los elementos constructivos adyacentes al reactor, como la contención de concreto o el mismo recipiente de presión. Por un lado, al actuar el core-catcher, el corium reaccionaría con un material de sacrificio que al ser incorporado a su mezcla se alterarían las propiedades fisicoquímicas y térmicas del material fundido, como son la disminución de la densidad, viscosidad, temperatura de solidificación, temperatura del corium y densidad de potencia de irradiación, con el objeto de facilitar su dispersión y enfriamiento. Por otro lado, el diseño del core-catcher posibilitaría el contacto directo o indirecto entre el corium y agua fría mediante el inundado y/o rociado del corium o mediante el pasaje de agua a través de cañerías internas al core-catcher. Esta agua acumularía el calor del material fundido al evaporarse y lo depositaría en regiones alejadas al precipitarse, permitiendo así un reciclado pasivo del agua. Ambos conceptos se ilustran en la **Fig. 8**, en donde se muestra el diseño de un core-catcher adoptado por el modelo de reactor EPR.

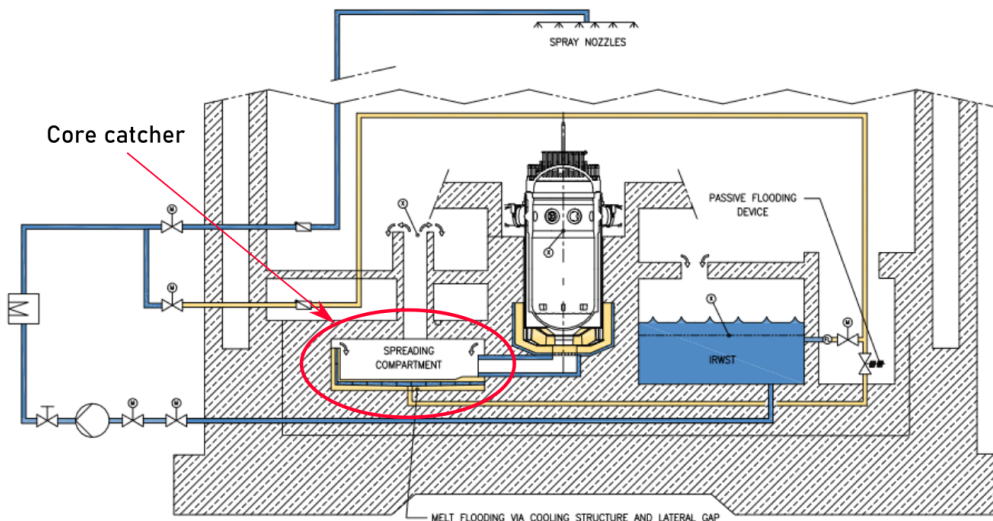


Fig. 8: Diseño de core-catcher incorporado en reactor tipo EPR [27].

2.2. Dispositivo retenedor de núcleo fundido en reactor Atucha I

Para poder completar la extensión de vida de CNAI será necesario alterar su infraestructura de manera que durante su segundo ciclo de vida se asegure una medida de mitigación de un

accidente severo. De esta manera en este trabajo se propone un diseño de un dispositivo que se instalará en esta central y con el cual se espera retener el núcleo fundido de Atucha I dentro de su esfera de contención, el mayor tiempo posible.

Como primera aproximación al diseño de este dispositivo, se toma en cuenta la experiencia adquirida en bibliografía, en la cual se menciona el desarrollo de los ya probados core-catchers, como es el caso del reactor EPR o el del tipo BiMAC del reactor ESBWR mostrado en la **Fig. 9**. Debido a que no sería posible realizar una modificación al recipiente de presión de Atucha I, el diseño del dispositivo a instalar en CNAI apuntará a resolver un accidente severo “Ex-vessel”.

Sin embargo, de las **Fig. 8** y **Fig. 9** se puede observar que construir un dispositivo similar requeriría de un espacio físico libre muy superior al que realmente cuenta CNAI actualmente y que realizar una obra civil de semejante envergadura no sería una opción viable si se tiene en cuenta el tiempo que las personas involucradas en la obra estarían expuestas a la radiación del núcleo activo de Atucha I, el tiempo necesario para completar dicha obra o la suma monetaria que requeriría. Además, aún cuando el dispositivo a instalar se adapte al espacio disponible dentro de la contención de CNAI, el espacio para trasladar elementos o componentes de construcción desde afuera hacia adentro de la contención limita los procesos convencionales de construcción. Por razones similares, la instalación de sistemas que asegurarían una fuente de agua fría con la cual inundar la cavidad del reactor y así evacuar el calor del corium, como lo hacen los modelos de core-catchers mencionados en la sección anterior, tampoco sería posible. Además, el volumen de material de sacrificio necesario para provocar un cambio significativo en las propiedades del corium, excedería el disponible en la contención de CNAI [35]. Es por estas razones que el dispositivo retenedor de núcleo fundido que se instalará en CNAI no seguirá la filosofía del funcionamiento de los core-catchers explicados en la sección anterior. Aún así, los materiales con los cuales son construidos deben cumplir las mismas exigencias, con lo que se tomará la experiencia de estos modelos para su selección.

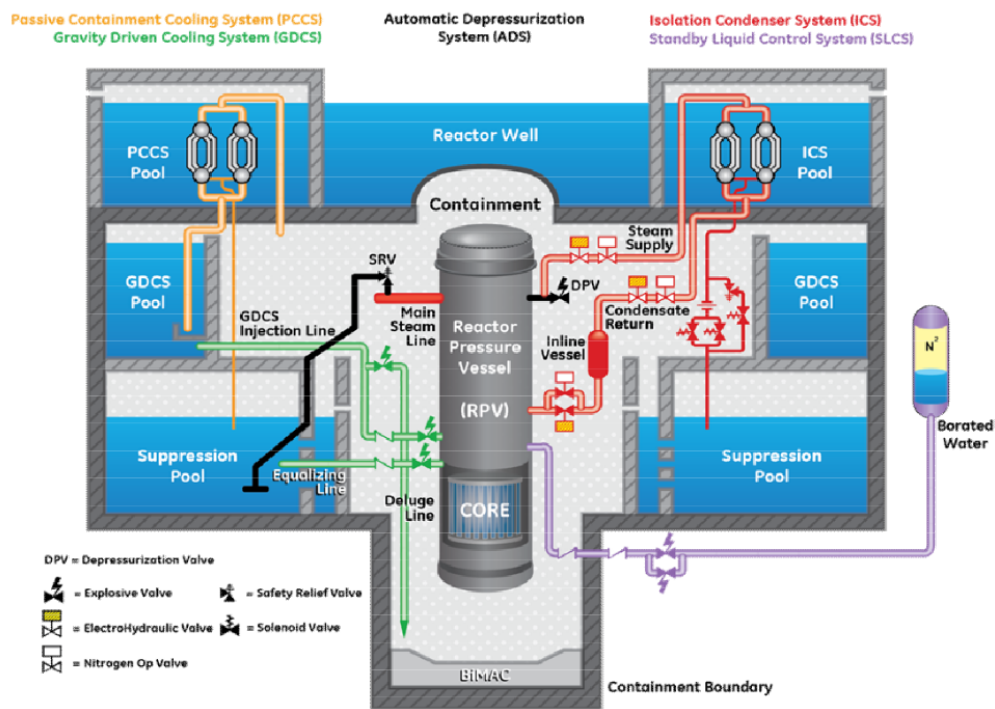


Fig. 9: Reactor modelo ESBWR con core-catcher BiMAC [29].

En la sección 1.2.2 se ha adelantado mediante la presentación de la **Fig. 5** el espacio disponible para la construcción del dispositivo contenedor de núcleo fundido y su topología. El modo de acción de este dispositivo será únicamente el de retención del corium, actuando como una barrera o dique sobre la zona de la trinchera de la contención. En las siguientes secciones se presentarán el diseño geométrico y la selección de los materiales del dispositivo junto con los criterios tomados para su elección y los resultados obtenidos luego del análisis de estos criterios.

3. Características topológicas de la barrera anti-derrame de núcleo fundido

A partir de planos de la contención de CNAI y teniendo en cuenta elementos auxiliares que forman parte de la misma que podrían obstruir la construcción de la barrera, se establece que el volumen máximo disponible para la instalación del dispositivo resulta tener las dimensiones (1000 mm profundidad X 1500 mm ancho X 1050 mm alto) [25]. Este espacio cubre la entrada desde la trinchera hacia la cañería de la bomba TJ y permite alcanzar una altura que sobrepasa la que el corium acumularía al estacionarse en el área de la trinchera para el caso del accidente de mayor masa de corium involucrada.

El modo y espacio de acceso hacia el sitio de instalación de la barrera desde afuera de la contención prohíbe el traslado de un dispositivo de dimensiones como las mencionadas en el párrafo anterior. Es así que, el diseño de la barrera debe permitir su construcción en el sitio de instalación y el traslado de los elementos constructivos por parte de los operarios, teniendo en cuenta dimensiones y peso. Además, debido a que el sitio de instalación se encuentra cercano al recipiente de presión del reactor activo, los operadores que fueran a construir la barrera se encontrarían recibiendo una dosis de radiación que restringe el tiempo que puedan participar en este trabajo. Es decir, que la construcción de esta barrera necesitará de la participación de varios operarios que deben realizar el traslado de los elementos constructivos y su instalación en el sitio de construcción en un tiempo limitado. Es por estas razones que el diseño de la barrera debe comprender un límite en el peso máximo de sus elementos constitutivos y debe optimizar el número de viajes a realizar por los operarios al sitio de instalación, necesarios para la construcción de la barrera.

Mediante comunicaciones con personal del Departamento de Ingeniería Civil de de NA-SA, se ha propuesto el diseño de la barrera mostrado en la **Fig. 10** [36]. Esta barrera comprendería de un paralelepípedo y ladrillos macizos posicionados de manera que ocupen todo el volumen (ver **Fig. 10**). Estos ladrillos se encontrarían apoyados en la parte posterior de la barrera sobre vigas de acero de alma de 10 cm que se amurarían a las paredes de concreto adyacentes a la barrera. Las dimensiones de los ladrillos que constituyen la barrera mostrada en la **Fig. 10** serían de (300 mm X 180 mm X 105 mm), con lo que la barrera quedaría compuesta por 5 ladrillos a lo ancho, 5 ladrillos a lo profundo y 10 ladrillos a lo alto (250 ladrillos en total).

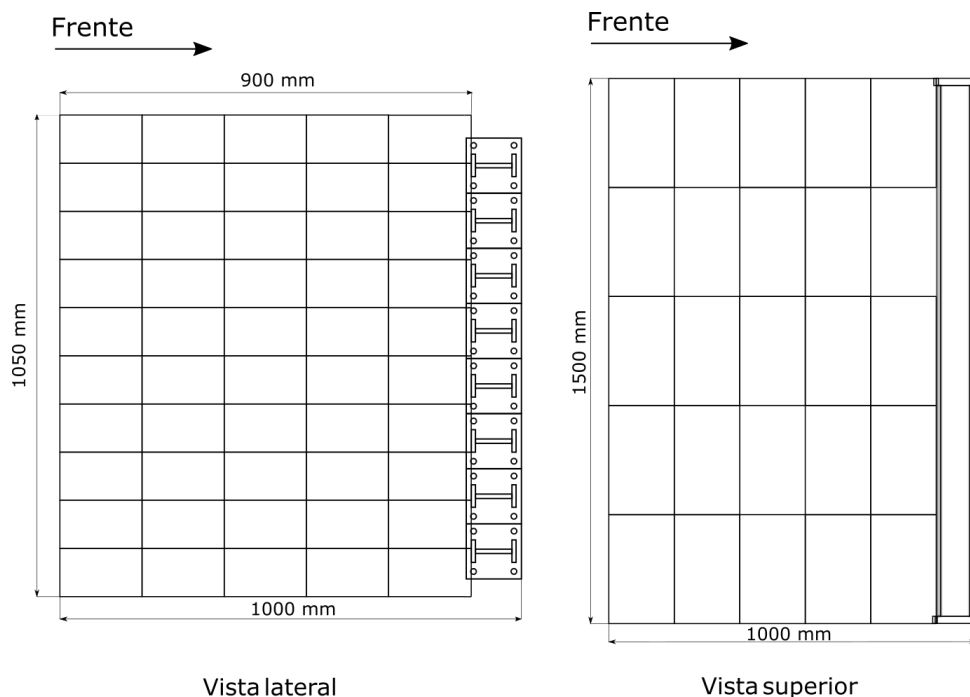


Fig. 10: Vistas lateral y superior de la barrera anti-derrame de núcleo fundido. Se indica la posición del frente de la barrera que estaría expuesta al corium.

Estas dimensiones de ladrillos surgen de optimizar el número de viajes necesarios para trasladar los ladrillos hacia el sitio de construcción y el peso máximo que podría transportar un operario. Sin embargo, por cuestiones de fabricabilidad, es posible que las dimensiones máximas alcanzables a obtener por prensado de ladrillos cerámicos sean inferiores a las propuestas. Es por esto que se ha decidido dividir cada ladrillo en 8 ladrillos de dimensiones mostradas en la **Fig. 11**, dejando a la barrera con un total de 2000 ladrillos.

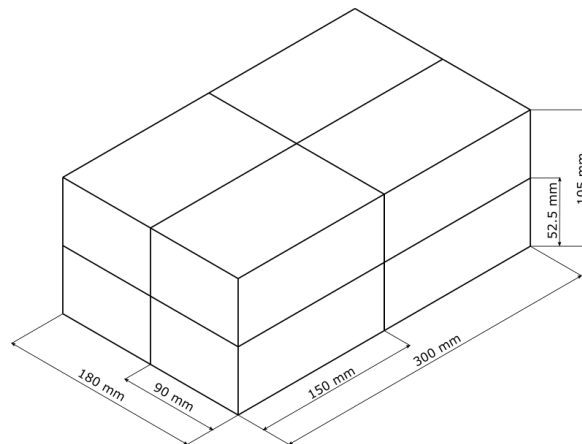


Fig. 11: Dimensiones de ladrillos constituyentes de la barrera anti-derrame. Se muestran dimensiones de ladrillo completo y dividido.

De esta manera, en caso de ser necesaria la compra de una nueva matriz que se adapte a las dimensiones de los ladrillos, el número de ladrillos fabricados permitirá amortizar el costo de la matriz. A pesar del incremento en el número de ladrillos, no se espera aumentar el número de viajes para transportarlos hacia el sitio de instalación ya que el peso del ladrillo básico (no dividido) no se ha incrementado. Los ladrillos se posicionarán simplemente apilándolos unos sobre otros, sin necesidad de utilizar un aglomerante que los mantenga unidos. Esto se debe a que, por un lado, no se ha encontrado un material que al mismo tiempo cumpla con esta función y con los requisitos que se mostrarán en la sección 5 de esta parte y, por otro, porque la barrera no debe soportar cargas mecánicas, con lo que no es necesario que los ladrillos se mantengan unidos para repartir la carga aplicada.

3.1. Diseño auxiliar de barrera anti-derrame de núcleo fundido

Para evitar una degradación prematura de la barrera al momento de ejercer su función, es preferible que el corium no se encuentre en contacto directo con los ladrillos. Es por esto que se propone cubrir a la barrera tanto en su frente como en su parte superior con dos placas de un metal refractario que se encuentren en contacto entre sí, como se muestra en las **Fig. 12** y **Fig. 13**.

De esta manera, no sólo se provee una protección al ataque químico de los ladrillos, sino que al aprovechar la alta conductividad térmica del metal y la gran superficie de la placa se provee un camino para la redirección del calor emitido por el corium hacia la zona superior de la barrera, en donde el metal intercambiará calor con el aire.

La ventaja del diseño de la **Fig. 13** respecto del diseño mostrado en la figura anterior, se basa en la maximización del intercambio de calor entre la placa superior y el aire. Sin embargo, se prevee una mayor dificultad para su instalación, ya que debido a la gran densidad de los metales refractarios (ver sección 5.3 de la **Parte III**), las placas aplicarán un gran esfuerzo sobre todo el sistema si no se encuentran debidamente soportadas.

El largo y ancho de la placa anterior debe ser suficiente para cubrir las dimensiones de la superficie de la barrera, mientras que la superior puede optimizarse considerando el peso y área de la misma. El espesor máximo de las placas está dado por la capacidad máxima de carga de la grúa instalada en la contención de CNAI.

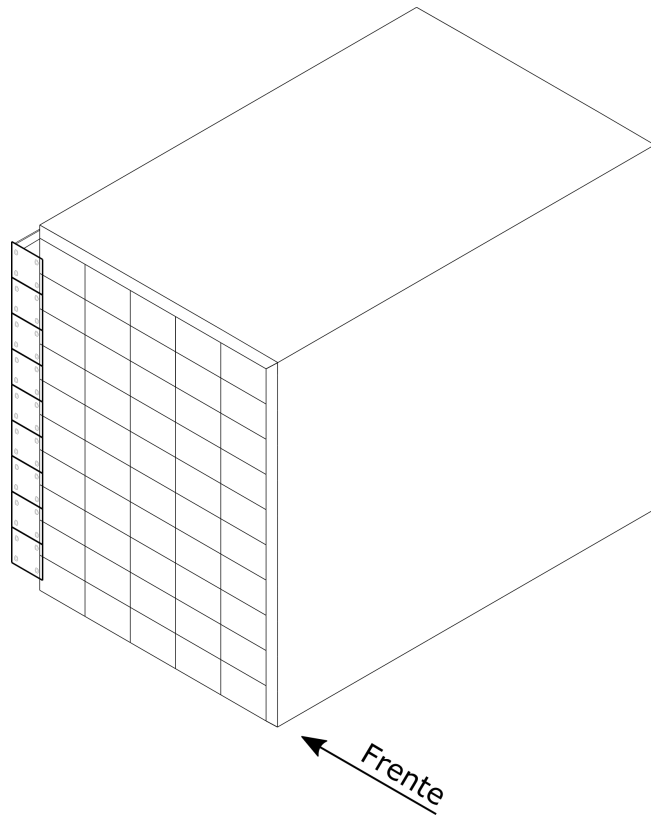


Fig. 12: *Diseño auxiliar de barrera anti-derrame de núcleo fundido con cubierta de metal.*

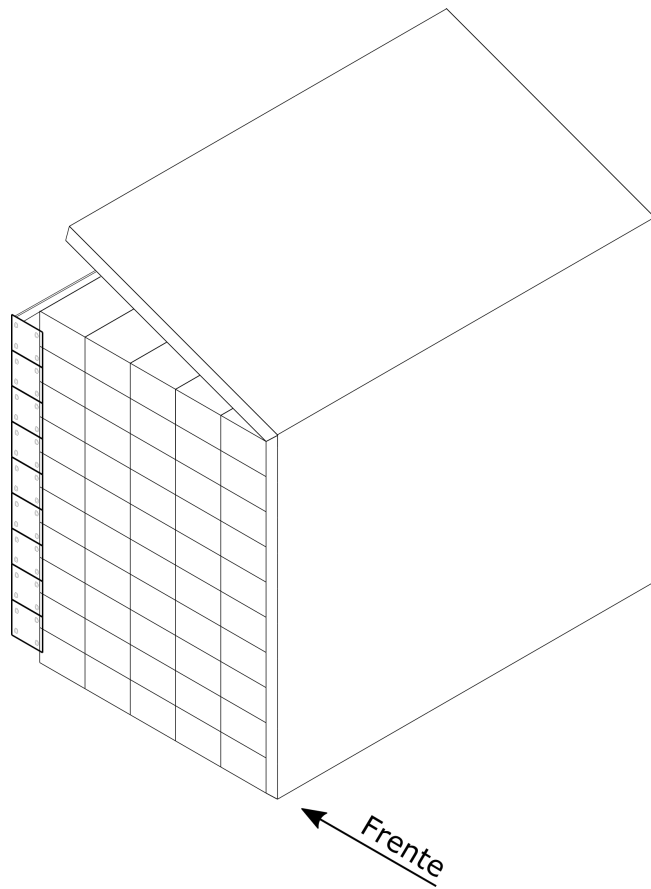


Fig. 13: *Diseño auxiliar de barrera anti-derrame de núcleo fundido con cubierta de metal.*

4. Estudio de desarrollo de accidente severo en CNAI

4.1. Estudio de MCCI en la contención de Atucha I

Una vez planteada la incorporación de un barrera con la geometría presentada en la sección anterior, personal del Departamento de Análisis Determinístico de Seguridad de NA-SA, realizó estudios de MCCI sobre la contención de CNAI. A partir de estos estudios se calcularon los tiempos de falla de la contención. Para cubrir todos los casos posibles a desarrollarse durante el accidente, se consideran dos temperaturas de corium, 2000 °C y 2557 °C, que son las temperaturas mínimas esperadas y la temperatura de eutéctico del sistema U-Zr-O y; dos potencias de decaimiento residuales, 5 MW y 10 MW, que son las potencias esperadas durante eventos transitorios tipo Station Black Out y Loss-of-Collant Accident. Estos resultados se encuentran ilustrados en la **Fig. 14** mediante el avance de la ablación sobre distintos subvolúmenes (cavidad, trinchera, sumidero y cañería) de la contención. De esta figura se observa que la condición más desfavorable resulta ser con la configuración de 2557 °C y 10 MW, con la que se obtiene un tiempo de falla de 13 hs sobre la cavidad, mientras que la más favorable es con la configuración de 2000 °C y 5 MW, con lo cual la cavidad fallaría a las 24 hs.

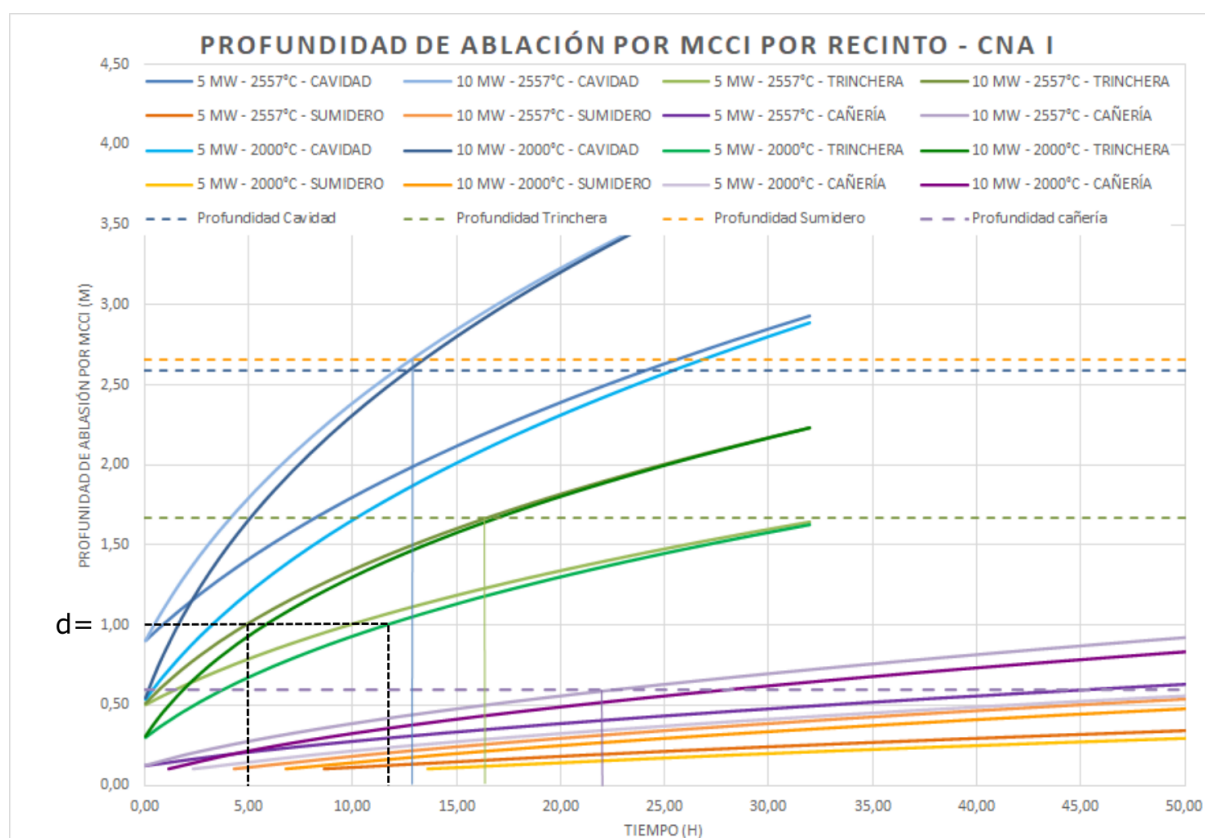


Fig. 14: Curvas de ablación del concreto de la contención de CNAI obtenidas a partir de MCCI por personal de NA-SA.

Durante los cálculos de MCCI, se considera que la barrera mantiene su integridad estructural y que la erosión del concreto es en la dirección vertical de la contención. Sin embargo, es posible que el corium ablacione las paredes y el suelo de concreto circundante a la barrera en la zona de la trinchera, provocando un by-pass. Esta situación es ilustrada en la **Fig. 15** en donde se muestra la desviación que tomaría el corium al ablacionar las paredes de concreto de la trinchera, y la profundidad "d" de la barrera que tendría que ablacionarse para que se genere el by-pass. Si se considera la misma velocidad de ablación para el piso de la trinchera que para las paredes y una distancia $d=1$ m (profundidad de la barrera), se observa de la **Fig. 14** que el by-pass se generaría a las 5 hs para la configuración de 2557 °C y 10 MW y a las 12 hs para una configuración de 2000 °C y 5 MW.

De todas maneras, se debe tener en cuenta que en los cálculos de MCCI a partir de los cuales se obtuvo la **Fig. 14** no se considera la dilución del corium por la incorporación de concreto a la mezcla, con lo que las velocidades de ablación podrían ser menores y el tiempo real de falla de cada subvolumen de la contención resultarían ser un número de veces mayor al indicado en el gráfico.

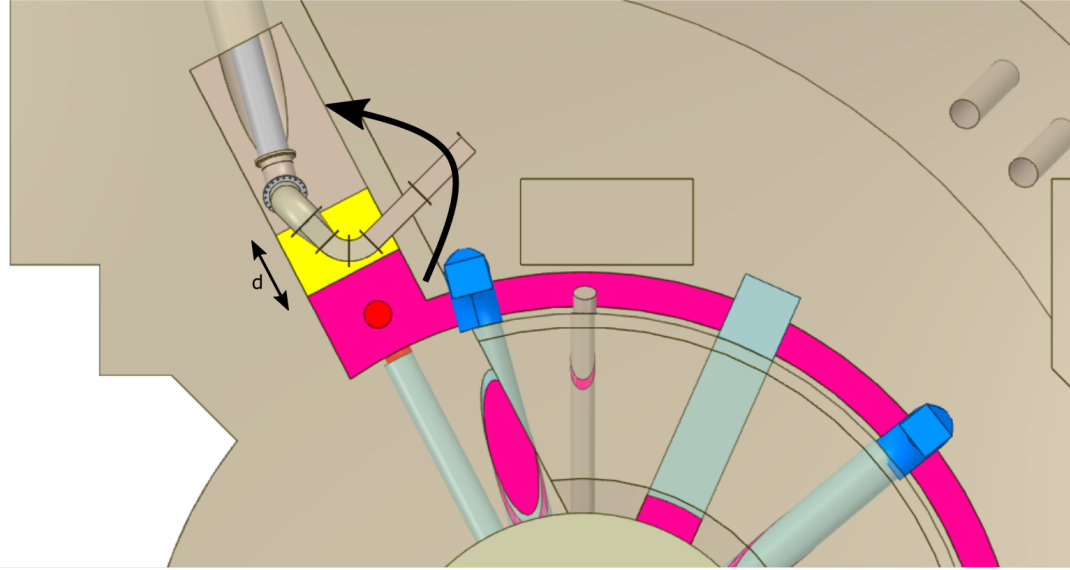


Fig. 15: Vista superior de la contención de CNAI. Se indica con una flecha negra curva, la desviación que podría tomar el corium luego de ablandar las paredes de concreto de la trinchera, y la profundidad d de la barrera anti-derrame.

4.2. Criterio de falla de la contención

Los cálculos de MCCI utilizados para obtener las curvas de ablación mostradas en la sección anterior se basan en análisis termodinámicos que involucran propiedades térmicas tanto del corium como del concreto. Dentro de estos cálculos no sólo se tiene en cuenta el aporte térmico a la fusión del concreto, sino que además, se agrega la interacción fisicoquímica entre ambos. Esta interacción aumenta la velocidad con la que el corium consume al concreto respecto de la que se obtendría si únicamente se tuviera en cuenta el aporte térmico. Esta situación se puede generalizar mediante la ecuación

$$\Delta t_V = \Delta t_V(\Delta t_T, \Delta t_{fq}) \quad (7)$$

en la que se indica que el tiempo Δt_V necesario para consumir un volumen V de cualquier material en contacto con el corium está dado por una contribución puramente térmica caracterizada por un tiempo Δt_T , que para una temperatura fija de corium depende únicamente de las propiedades térmicas del otro material y de las condiciones de intercambio de calor; y una contribución fisicoquímica caracterizada por un tiempo Δt_{fq} , que depende de las características termodinámicas y cinéticas del sistema dado por el corium y el otro material.

Esto quiere decir, por un lado, que incluso cuando la temperatura de fusión del segundo material se encuentre muy por encima de la del corium, éste podría ablandar al segundo material mediante la interacción fisicoquímica; y por el otro, que aún cuando la termodinámica permita esta interacción, su cinética podría resultar lo suficientemente lenta como para considerar a ambos materiales inertes. Como se mencionó arriba, ambas contribuciones son conocidas para el sistema corium-concreto y se tienen en cuenta durante los cálculos de MCCI. Sin embargo para otros materiales se desconoce el aporte fisicoquímico que tendría la interacción de ambos materiales sobre la velocidad de ablación.

Durante el desarrollo del accidente, el corium estará en contacto tanto con el concreto de la contención como con los materiales que constituyan la barrera a construir. De esta manera, la falla de la contención sucederá en un tiempo que dependerá simultáneamente del tiempo de falla del concreto y de los materiales de la barrera según:

$$\Delta t_{\text{falla}} = \min[\Delta t_{\text{T}}^{\text{concreto}}, \Delta t_{\text{fq}}^{\text{concreto}}, \Delta t_{\text{T}}^{\text{barrera}}, \Delta t_{\text{fq}}^{\text{barrera}}] \quad (8)$$

Las dos primeras contribuciones se encuentran incluidas dentro de los modelos de MCCI, mientras que de las dos últimas se puede evaluar únicamente el aspecto térmico, dado que no se conoce la interacción entre los materiales propuestos para construir la barrera y el corium.

Tomando las situaciones más y menos favorables planteadas en los cálculos de MCCI de la **Fig. 14**, y considerando la ablación de las paredes de la trinchera ($d=1$ m), las contribuciones del corium a la ecuación 8 serían:

$$\Delta t_{\text{T}}^{\text{concreto}} + \Delta t_{\text{fq}}^{\text{concreto}} = 12hs; \quad \text{si } T_{\text{corium}} = 2000^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

$$\Delta t_{\text{T}}^{\text{concreto}} + \Delta t_{\text{fq}}^{\text{concreto}} = 5hs; \quad \text{si } T_{\text{corium}} = 2557^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

Sin embargo, en la sección anterior se comentó que estos resultados son conservadores, por lo que se aplicará un coeficiente de seguridad $k=2$ a los tiempos de falla, para considerar la dilución del corium por la incorporación de concreto a su mezcla. Así, los tiempos de falla del concreto resultarían ser de 10 hs para una temperatura de corium de 2557°C y de 24 hs para una temperatura de 2000°C . Estos son los tiempos durante los cuales la barrera debería mantener su integridad estructural para que no falle antes que la contención.

5. Materiales propuestos para la construcción de la barrera anti-derrame de núcleo fundido

A continuación se describen los criterios que se tuvieron en cuenta para la selección de los materiales para la construcción de la barrera. Dichas exigencias, comprenden desde propiedades intrínsecas y extrínsecas hasta fabricabilidad o disponibilidad. Las mismas fueron consideradas durante la búsqueda de materiales y se listan debajo:

- **Alta temperatura de fusión:** En la sección 1.3 de la **Parte III** se comentó que el material fundido puede alcanzar temperaturas mayores a 2500 °C. Si los materiales de construcción de la barrera poseen temperaturas de fusión inferiores, no se podrá asegurar que la barrera mantenga su integridad estructural durante su funcionamiento.
- **Baja emisión de gases no condensables:** Tanto por calentamiento como por interacción con el corium, los materiales de construcción no deben emitir gases que puedan aportar a la sobrepresurización de la contención.
- **Compatibilidad fisicoquímica con el corium:** El material que se encuentre en contacto directo con el corium debe ser estable fisicoquímicamente. De lo contrario, aún cuando su temperatura de fusión supere la temperatura del corium, se generará una degradación prematura de la barrera. Esto podría suceder a través de transformaciones químicas de los materiales, como reacciones de reducción u oxidación, o disolución por los componentes del corium.
- **Resistencia mecánica a cambios de temperatura:** En el momento de inicio del accionamiento de la barrera, ésta se encontrará a temperaturas levemente mayores a la ambiente y, en el transcurso de su funcionamiento, alcanzará temperaturas vastamente superiores. Durante esta evolución, los materiales de construcción deben ser capaces de soportar cambios dimensionales internos debido a expansiones térmicas o de transformaciones alotrópicas.
- **Fabricabilidad:** Las tecnologías de fabricación de productos asociadas a los materiales elegidos deben permitir fabricar ladrillos de dimensiones como las presentadas en la sección 3 de esta parte del trabajo.
- **Recriticidad del corium:** El corium se encuentra compuesto mayormente por combustible que aun luego de su escape del RPV, posee una potencia de radiación residual. Los materiales que fueran a estar en contacto con el corium no deben reactivar al combustible.
- **Estabilidad en contacto con agua:** Una vez construida la barrera, esta debe conservar su integridad estructural durante los 24,25 años del segundo ciclo de vida de CNAI. Durante este período, la central soportará eventos tipo Accidentes Base de Diseño, que comprenden aquellos que involucran pérdida de refrigerante, que se depositará sobre la contención y podrá alcanzar a la barrera. Los materiales de construcción de la barrera deben ser inertes al contacto de este refrigerante.
- **Radiactividad y toxicidad:** Los ladrillos que compondrán la barrera serán manipulados por el personal de la central. Es preferible que los materiales no conlleven un riesgo a la salud del personal durante la instalación de estos ladrillos.

Una vez reconocidas estas exigencias, se comenzó una búsqueda bibliográfica de los materiales candidatos con los que se podría construir la barrera. En las siguientes secciones se analizarán varios posibles materiales, teniendo en cuenta las exigencias mencionadas, y se listará aquellos que se ha encontrado cumplen todas las exigencias y aquellos que por el incumplimiento de alguna no permite su postulación como candidato.

5.1. Materiales de ultra alta temperatura

Las condiciones de temperatura que imponen contener un material como el corium, exige tener en cuenta materiales cuyas temperaturas de fusión sean lo más altas posible. Es por esto que como primera medida, la búsqueda de materiales se orientó a los denominados materiales de ultra alta temperatura.

Los materiales de ultra alta temperatura se pueden definir como materiales cerámicos basados en boruros, carburos y nitruros de metales como Zr, Ti, Ha o Ta y se caracterizan por tener temperaturas de fusión mayores a 3000 °C, resistencia mecánica relativamente alta para un cerámico (tan alta como 800 MPa), alta dureza que se mantienen hasta temperaturas de 1500 °C, alta conductividad eléctrica y térmica y resistencia a la corrosión por metales y escorias no básicas. Además de estas propiedades, los materiales de ultra alta temperatura poseen ventajas sobre los metales refractarios (como el W, Mo, Ir) en cuanto a su baja densidad y bajo coeficiente de expansión térmica. Estas características resultan ser atractivas para las aplicaciones que demandan un rendimiento tan exigido como son los campos de vehículos supersónicos, escudos de vehículos de re-entrada a la atmósfera y propulsión [37, 38].

A pesar de estas propiedades, es la característica más sobresaliente de estos materiales la que limita su aplicación en varios campos y, en particular, para el objetivo de este trabajo. Al igual que para los cerámicos convencionales, los procesos de fabricación asociados a los materiales de ultra alta temperatura involucran la manipulación de los mismos en forma de polvos para formar piezas, como son los procesos de hot pressing, pressureless sintering y spark plasma sintering. Sin embargo, al poseer temperaturas de fusión y vaporización tan altas, las piezas formadas a partir de estos procesos poseen dos desventajas excluyentes para la aplicación aquí buscada. Por un lado, las características microestructurales (gran tamaño de grano, baja densidad teórica alcanzable) de los productos fabricados a partir de estos procesos, generan que las propiedades fractomecánicas obtenibles, no puedan acompañar a las altas propiedades mecánicas mencionadas en el párrafo anterior. Por otro lado, y por las mismas razones, las dimensiones de las piezas que pueden ser fabricadas a partir de estos materiales se encuentran limitadas en unos pocos centímetros, con lo que no sería posible obtener ladrillos como los mencionados en la sección 3 [37, 38]. Además, los carburos, boruros y nitruros que componen estos materiales se descompondrían en presencia del UO_2 del corium a alta temperatura [39].

Luego de evaluar las características de los materiales de ultra alta temperatura se decidió que no cumplen con las exigencias mencionadas anteriormente para permitir la fabricación de los ladrillos con los que se construirá la barrera anti-derrame.

5.2. Materiales cerámicos refractarios

Dado que se descartó de los materiales candidatos a los cerámicos técnicos mencionados anteriormente, se decidió investigar a los materiales cerámicos refractarios disponibles en el mercado.

Comenzando con los menos convencionales, se evaluó la posibilidad de implementar el material UO_2 basado en U-238. Las ventajas de este material como candidato para construir los ladrillos se basa en que, por un lado, su temperatura de fusión es mayor a la del corium ya que, al incluir otros componentes en su mezcla, la temperatura de fusión del corium resulta ser menor a la del UO_2 puro y, por otro lado, la fase cerámica del corium se encuentra saturada en este material con lo que no se esperaría un ataque químico a los ladrillos. Sin embargo, existen una serie de desventajas que impiden su implementación como son, su corrosión por parte del óxido de hierro presente en el corium, su inestabilidad dimensional en presencia de O_2 durante su calentamiento, su complicada disponibilidad y consecuentemente su costo y su toxicidad y radiactividad [39]. Estas desventajas dejan al dióxido de uranio fuera de la lista de candidatos.

Dentro de los materiales refractarios más convencionales, el grafito es el de mayor estabilidad térmica. A presión atmosférica alcanza una temperatura de sublimación (en vez de fusión) de 3600 °C [40]. Además, se encuentra fácilmente disponible como ladrillos de gran tamaño. Sin embargo, presenta un número de inconvenientes al evaluar su condición para formar parte de

la barrera. En primer lugar, en presencia de oxígeno el grafito se oxida fuertemente formando CO a temperaturas mayores a 400 °C [41]. Aún más, en presencia de UO₂ reacciona formando UC, UC₂, CO y CO₂. De esta manera, no sólo se degradaría por corrosión frente al corium sino que aportaría a la sobrepresurización de la contención por liberación de gases no condensables. En segundo lugar, el grafito actúa como moderador de neutrones, por lo que su posición frente al material de núcleo fundido implicaría un riesgo de recritización [39]. Estas características obligan a descartar al grafito como material candidato.

En los documentos en los que se detallan las características constructivas de los core-catchers presentes en los modelos de reactores EPR y ABWR, se menciona la utilización de alúmina (Al₂O₃) y zirconia (ZrO₂) como materiales estructurales para el soporte de las cargas térmicas impuestas por el corium a estos dispositivos [27, 28]. En estos documentos se asegura que ambos materiales son inertes frente al corium, sin embargo es posible que ambos materiales sean atacados por el óxido de hierro presente en la fase cerámica del corium [39]. Por otro lado, se reporta que la zirconia sería prácticamente inerte frente al corium [30].

La zirconia posee una temperatura de fusión superior a los 2700 °C pero presenta dos cambios de fase martensíticos al calentarlo desde temperatura ambiente hasta su temperatura de fusión (monoclínica → tetragonal → cúbica). Estos cambios de fase generan un cambio volumétrico que provocan la fractura de piezas policristalinas de gran volumen. Sin embargo, mediante la adición de ciertos iones (Y³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) a la estructura cristalina de la zirconia, es posible estabilizar la fase cúbica a temperatura ambiente, con lo que se evita los cambios de fase y por consiguiente, la fractura de las piezas fabricadas a partir de este material [42]. De esta manera, es común encontrar en el mercado ladrillos en base a zirconia parcialmente estabilizada, no solubles en agua [43].

La alúmina, por otro lado, posee una temperatura de fusión no mayor a los 1900 °C, teniendo en cuenta que los ladrillos comercialmente disponibles se fabrican en base a corindón, que al contener impurezas disminuyen la temperatura de fusión respecto de la alúmina pura. Aún así, no se descartará este material por esta razón ya que, respecto de la zirconia, posee la ventaja de que los ladrillos de alúmina se pueden conseguir a partir de proveedores nacionales. Además, se evaluará que la barrera sea construida a partir de más de un material, con lo que al incorporar a la alúmina se pueden reducir costos manteniendo aún su funcionalidad. Finalmente se reporta que la alúmina no es soluble en agua [44].

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se tomaron como candidatos para construir la barrera a la alúmina y a la zirconia parcialmente estabilizada.

5.3. Materiales metálicos refractarios

En la sección 3.1 de esta parte del trabajo, se mostró un diseño auxiliar de la barrera a instalar en CNAI, en el cual los ladrillos son cubiertos por placas de un metal refractario. Las características más destacables de este tipo de materiales, además de su superior conductividad térmica respecto de los materiales presentados anteriormente, son su alto punto de fusión (entre 2468 °C y 3410 °C) y su gran densidad (entre 8,57 g/cm³ y 21,04 g/cm³).

Dentro de este grupo de materiales, existen varios candidatos con los cuales se podrían fabricar las placas, como el W, Nb, Ta, Re y Mo. Sin embargo, de todos estos metales, solamente se ha encontrado compatibilidad fisicoquímica con el corium para el Re [39]. Por otro lado, una desventaja que poseen estos materiales es su activa oxidación a alta temperatura en presencia de atmósferas oxidantes. En particular, el Re forma óxidos volátiles de baja temperatura de ebullición (363 °C para el Re₂O₇), que no permiten formar una barrera protectora a la corrosión por parte del oxígeno [45].

Una solución a este problema, surge de las tecnologías de propulsión, utilizadas en vehículos a reacción y cohetes. Mediante procesos de Chemical Vapor Deposition, se puede depositar capas de iridio sobre el renio para aumentar su resistencia al ataque del oxígeno y permitiendo así extender el tiempo de vida de un componente de Re expuesto al aire a altas temperaturas [46, 47, 48]. Aún así, se debe tener en cuenta de la dificultad logística que traería realizar esta

operación y el incremento en el costo final de las placas.

Como otra solución, se propone prescindir de la placa superior y utilizar una placa de renio sin tratar con iridio para utilizar como material de sacrificio sobre la pared frontal de la barrera. De esta manera, a pesar de que se pierde la capacidad de redirigir el calor del corium, se provee de una protección extra a los ladrillos, ya que al quedar cubierta por el corium durante su funcionamiento, la placa no sería atacada de manera intensa por el oxígeno de la atmósfera.

Por todas las razones mencionadas anteriormente, se considera al renio como material candidato para la fabricación de una placa protectora de los ladrillos de la barrera anti-derrame.

5.4. Materiales acumuladores de energía térmica

El último grupo de materiales investigado para formar parte de la barrera, consiste en los materiales denominados acumuladores de energía térmica (MAET). Estos materiales son normalmente utilizados en las plantas concentradoras de energía solar, para actuar como medio de almacenamiento de energía calórica. Los MAETs pueden acumular energía mediante tres formas distintas: mediante el denominado calor sensible, que es el calor necesario para generar un aumento de temperatura del material y está dominado por el calor específico; mediante el calor latente, que es el calor necesario para provocar un cambio de fase (sólido-líquido, líquido-gas) y está dominado por la entalpía del cambio de fase; y mediante transformaciones químicas endotérmicas y reversibles, que están dominadas por la entalpía de la reacción [49]. Esta tecnología podría ser aprovechada al utilizarla como material de sacrificio, de manera similar a la presentada en los diseños de los core-catcher mencionados en secciones anteriores. En este caso, estos materiales actuarían como absorbedores del calor emitido y acumulado por el corium, provocando su enfriamiento y solidificación, y proveyendo una protección a los elementos constructivos adyacentes de la contención.

Los MAETs basados en calor latente, denominados materiales de cambio de fase (MCF), pueden ser sólidos o líquidos y tienen como ventaja frente a los otros MAETs una mayor densidad de energía acumulable y que durante su funcionamiento mantienen la temperatura estable en un pequeño rango [49]. Ambas características son deseables para la aplicación aquí buscada, ya que el volumen disponible para la construcción de la barrera es limitado y porque se busca proteger del daño térmico a los elementos constructivos adyacentes de la contención.

Por una cuestión de simplicidad y logística se preferiría que, de formar parte de la barrera, un MCF se encuentre en estado sólido hasta el momento de su funcionamiento, por lo que se descartan los MCF líquidos. Dentro de los MCF sólidos se ha encontrado que el LiF posee la mayor densidad calórica de cambio de fase (1800 MJ m^{-3}) con una temperatura de cambio de fase de $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [49]. Para la aplicación buscada en este trabajo, estas propiedades no resultan satisfactorias ya que incluso ocupando todo el volumen disponible para la construcción de la barrera con este material, el calor acumulable no resultaría ser suficiente para concentrar el calor de toda la masa de corium y, además, debido a la baja temperatura de cambio de fase comparada con la temperatura del corium, el LiF se encontraría en estado líquido luego de cumplir su función, con lo que dejaría expuesto al corium remanente sin solidificar, a los elementos que se busca proteger detrás de la barrera.

Por estas razones, no se aconseja depender exclusivamente de esta tecnología para la fabricación de la barrera y no se tendrán en cuenta estos materiales como candidatos a formar parte de la misma. Aún así, estos materiales podrían ser aplicados para facilitar la solidificación del corium y disminuir el daño a la contención.

6. Estudio de desempeño de materiales candidatos

En la sección 4.2 se establecieron los tiempos durante los cuales la barrera debería mantener su integridad estructural, para que su falla no resulte prematura respecto de la falla de la contención por by-pass de la barrera. Para asegurar el correcto funcionamiento de la barrera, se planteó la resolución de un problema térmico que simulara las condiciones a las cuales estará expuesta la barrera durante el desarrollo del accidente. Esta simulación no tiene en cuenta la interacción fisicoquímica entre el corium y los materiales de la barrera, ya que como se ha explicado anteriormente, se desconoce las características de estas interacciones para los materiales propuestos. De esta manera, los resultados de estas simulaciones otorgarían la contribución $\Delta t_{\text{barrera}}$ de la ecuación (8) de la sección 4.2 de la **Parte III**. El desarrollo del modelo térmico aquí planteado y de elementos finitos utilizado para su resolución, fue realizado por personal del CIMEC-UNL y no forma parte de este trabajo.

Para el análisis del problema térmico se planteó la resolución a la ecuación del calor sobre el sistema mostrado en la **Fig. 16**:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T \quad (11)$$

En esta ecuación, T es la temperatura del sistema al tiempo t ; k es la conductividad térmica del material del sistema a la temperatura T y ρC_p es la capacidad calorífica efectiva del material a la temperatura T . Para la resolución a esta ecuación se propusieron las condiciones de borde y la condición inicial dadas mostradas en el lado derecho de la **Fig. 16**.

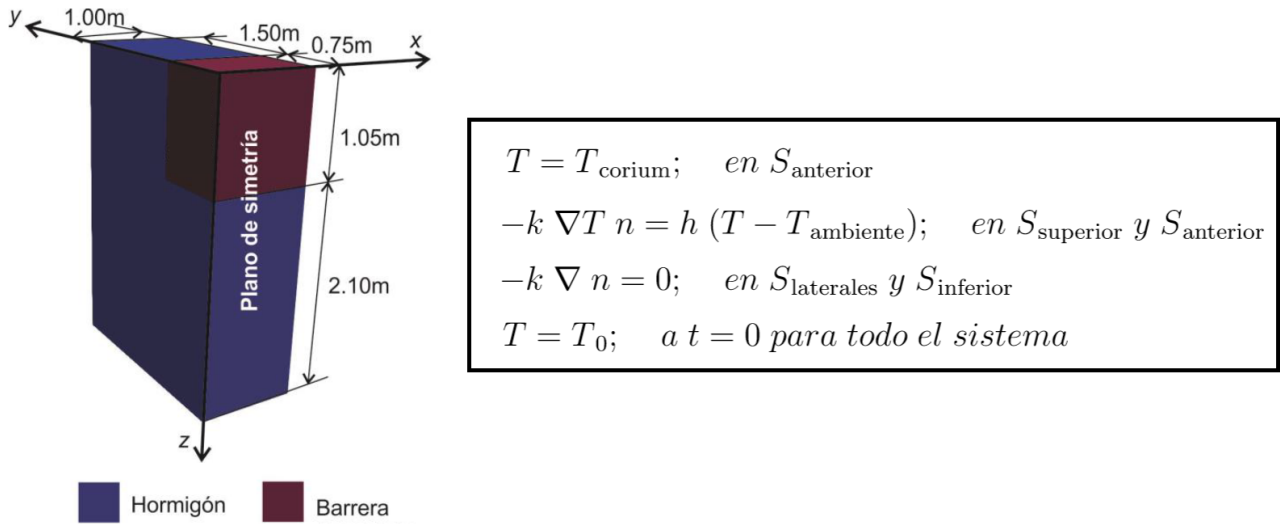


Fig. 16: Sistema planteado para la simulación del problema térmico. Se muestra mitad de la barrera junto con parte de la contención de hormigón circundante. En el lado derecho de la imagen se muestran las condiciones de borde y la condición inicial impuestas para la resolución al problema térmico.

Con estas condiciones se indica que la superficie frontal de la barrera se encuentra en contacto perfecto con una fuente de calor infinita de temperatura constante T_{corium} , que se tomó como 2000 °C y 2557 °C para resolver los distintos casos evaluados según los resultados de los cálculos de MCCI presentados en la sección 4.1 de la **Parte III**; que las superficies superior y posterior de la barrera intercambia calor con el aire a temperatura ambiente por convección con un coeficiente $h=40 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$; que las superficies de la barrera en contacto con el hormigón no transmiten calor hacia el interior del hormigón; y finalmente que todo el sistema (barrera y contención) se encuentra inicialmente a una temperatura $T_0=60 \text{ °C}$.

La primera condición se basa en que teniendo en cuenta la masa involucrada de corium y la potencia residual de decaimiento, se toma que para los tiempos evaluados en el problema el corium es capaz de entregar calor sin modificar su temperatura. Esta condición no se considera

realista, sino exagerada, ya que no se simula el cambio en las propiedades físicas del corium que afectan al intercambio del calor durante la evolución del problema (densidad, viscosidad, composición química), ni la formación de una costra en la superficie del corium que lo aisle térmicamente de la barrera.

La tercera condición se basa en que en los cálculos de MCCI, se considera al hormigón como un aislante térmico, con lo que todo el calor aportado hacia este material es utilizado para su fusión [30].

Durante la simulación del problema térmico se consideró a la barrera como un sólido continuo, sin discretizar los ladrillos que la compondrían en la realidad.

Para poder resolver el problema térmico se necesitó conocer las propiedades conductividad térmica y capacidad calorífica efectiva, de los materiales involucrados en el sistema, detalladas desde temperatura ambiente hasta los 2557 °C. Para conseguir estas propiedades se buscó tanto en bibliografía como en información otorgada por proveedores de estos materiales. Para todos los materiales planteados, la información encontrada de alguna o ambas propiedades no alcanza la temperatura requerida. Es por esto que fue necesario realizar una extrapolación de los datos hallados de cada propiedad, para poder completar el rango de temperaturas faltante en cada set de datos. Los criterios y modelos tomados para realizar las extrapolaciones se detallan en el **Anexo C**. En la **Fig. 17** se muestran las propiedades encontradas para los materiales candidatos y extrapoladas hasta la temperatura máxima del corium.

Durante la recopilación de información de las propiedades requeridas, se ha notado una gran dispersión en los comportamientos de las mismas y los valores informados para los materiales cerámicos buscados. Estos valores se encuentran influenciados por las características físico-químicas del material como su composición química, tamaño de grano y porosidad [50, 51]. Dados que las características resultantes de un ladrillo fabricado a partir de estos materiales son dependientes del proceso de fabricación, sería preferible utilizar en las simulaciones datos obtenidos a partir de mediciones sobre productos comercialmente disponibles. Aún así, de los materiales cerámicos tratados en este trabajo, se han obtenido propiedades correspondientes a materiales proporcionados por proveedores únicamente para la zirconia. Para la alúmina, las propiedades encontradas han sido medidas sobre productos similares a los provistos por una empresa nacional consultada. Finalmente, dado que no se conocen las características del concreto que compone la contención de Atucha I, se han recopilado propiedades genéricas de este material.

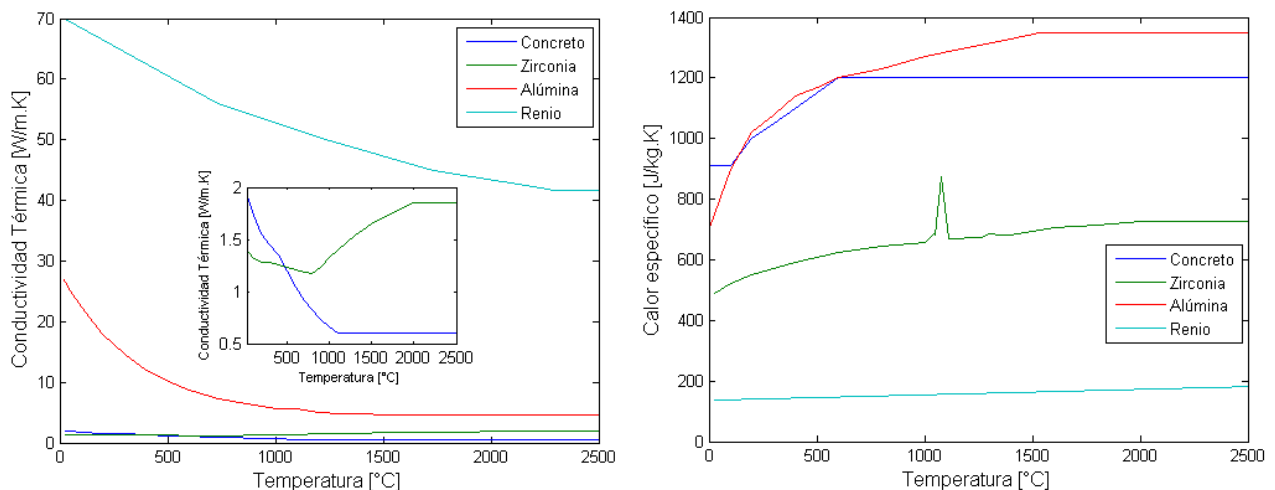


Fig. 17: Comparación de propiedades térmicas de materiales involucrados en el sistema estudiado. Se incluye la extrapolación hasta 2500 °C de la información encontrada para concreto [52], zirconia dopada con CaO[53], alúmina [54] y renio [55].

Una vez conseguidas las propiedades, fue posible introducirlas en el modelo térmico para simular el contacto del corium con los materiales de la barrera. En las **Fig. 18** y **Fig. 19** se muestran los resultados de las simulaciones extendidas durante tres días para una barrera compuesta en su totalidad por zirconia y por concreto (hormigón) y con una temperatura de corium de 2557 °C. Para facilitar la visualización del sistema, se removió la barrera y se eligieron dos colores para representar aquellas superficies que en cada instancia de tiempo se encuentran a una temperatura superior o inferior a 1000 °C, que es una temperatura suficiente para degradar por completo al concreto.

Temperatura fuera de la barrera hecha de zirconia

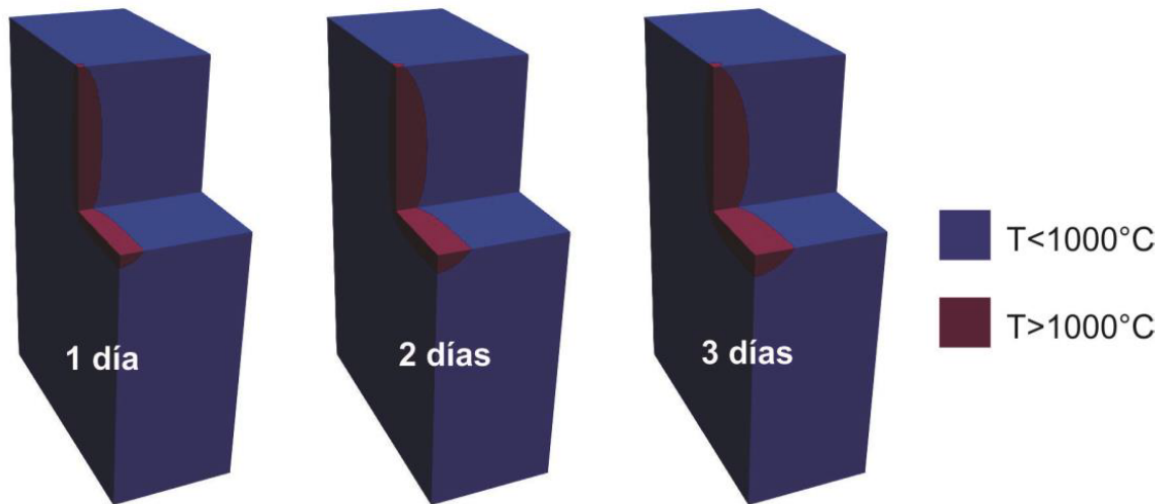


Fig. 18: Simulación de problema térmico con barrera compuesta por zirconia.

Se observa de la **Fig. 18** que, según el modelo térmico propuesto, una barrera compuesta totalmente de zirconia podría soportar las cargas térmicas impuestas por el corium, siendo que solamente alrededor de un tercio de la profundidad de la barrera alcanzó una temperatura superior a los 1000 °C y que la temperatura de fusión de la zirconia es superior a la del corium. Es así que, la contribución $\Delta t_T^{\text{barrera}}$ para la barrera compuesta por este material, resulta ser superior al límite impuesto por el by-pass de 10 hs, comentado en la sección 4.2 de esta parte del trabajo.

Temperatura fuera de la barrera hecha de hormigón

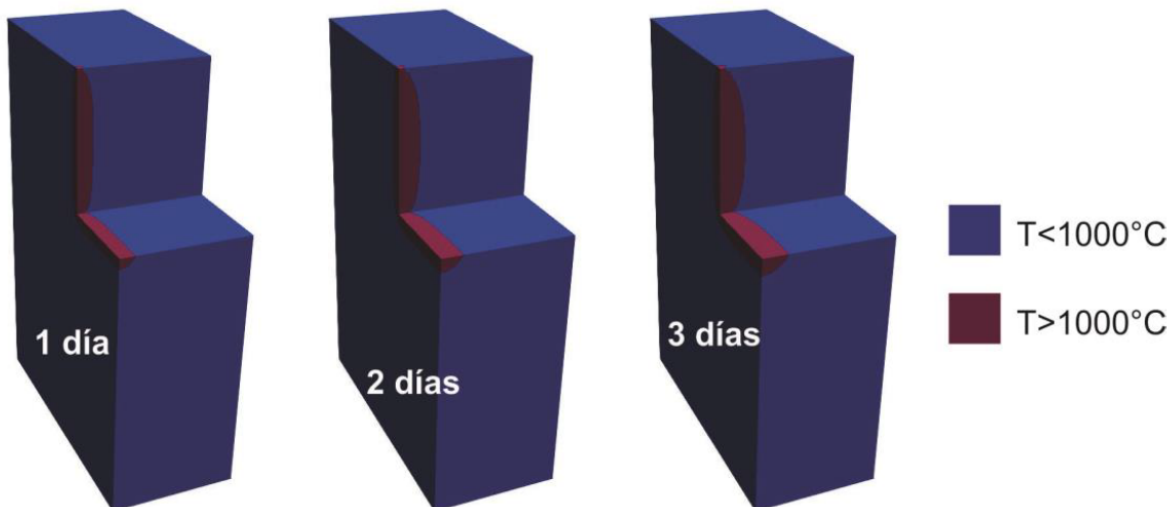


Fig. 19: Simulación de problema térmico con barrera compuesta por concreto (hormigón).

A modo de comparación se muestra en la **Fig. 19**, la simulación de una barrera compuesta de concreto, en la que se puede observar una situación similar a la anterior. Si durante la selección de materiales para fabricar la barrera se tuviera en cuenta únicamente el aspecto térmico de la interacción entre el corium y la barrera y se ignorara la interacción fisicoquímica entre ambos, como es la disolución del concreto en el material fundido, se llegarían a conclusiones erróneas respecto de la capacidad del concreto para estar en contacto con el corium.

Aún así, se debe tener en cuenta que en el modelo propuesto, el corium se encuentra en contacto únicamente con la cara anterior de la barrera, mientras que en una situación real, el material fundido también estaría en contacto con las caras anteriores del concreto circundante a la barrera. De esta manera, la velocidad de calentamiento del concreto resultaría ser superior a la mostrada en estas figuras y el frente de temperatura mostrado en las mismas como superior a 1000 °C, se movería más rápidamente, cubriendo una mayor porción del sistema.

Es por esto que, no es posible tomar estas simulaciones como criterio único para la selección de los materiales con los que se construirá la barrera.

7. Conclusiones

Durante esta última parte del trabajo se presentó la problemática relacionada a la mitigación de un accidente severo en la Central Nuclear Atucha I y una posible solución a la misma. Debido al diseño del reactor, la solución se restringió a una que tratara con un accidente del tipo “Ex-Vessel” y que se adaptara a las limitaciones geométricas y de tiempo impuestas por el mismo.

Se propusieron diseños para la construcción de una barrera, con la cual se confinaría el núcleo fundido del reactor dentro de su contención y se propiciaría su enfriamiento. A partir de los resultados del análisis de accidente severo, llevados a cabo por personal del Departamento de Análisis Determinísticos de Seguridad de NA-SA, se establecieron criterios de falla de la contención, como base para los requerimientos funcionales de la barrera.

Teniendo en cuenta las características fisicoquímicas del núcleo fundido, las condiciones térmicas que impone el mismo sobre otros materiales y las características geométricas de la barrera, se efectuó una búsqueda de materiales con los cuales se fabricarían ladrillos que compondrían la barrera mencionada. Es así que, luego de descartar aquellos materiales que no cumplen con ciertos requerimientos impuestos, se encontró que la alúmina y la zirconia parcialmente estabilizada, podrían ser utilizados para la fabricación de los ladrillos. Además se encontró que el renio tratado con iridio puede ser utilizado para la fabricación de placas de sacrificio.

Para establecer el desempeño de estos materiales durante el funcionamiento de la barrera, personal del CIMEC-UNL realizó simulaciones con las que se obtuvo la contribución térmica al tiempo de falla de la misma. Para esto, primero se debió llevar a cabo una búsqueda, en bibliografía y a partir de proveedores de los materiales mencionados, de propiedades térmicas de los mismos. En aquellos casos en los cuales la información hallada no era detallada hasta la temperatura requerida por las simulaciones, se debió realizar una extrapolación de los datos. Para esto, se propusieron modelos de aproximación a los mismos y se establecieron criterios conservadores para la elección del modelo más adecuado.

A partir de las simulaciones, se obtuvo, como primera aproximación, que una barrera compuesta en su totalidad por zirconia podría soportar las cargas térmicas impuestas por el material de núcleo fundido durante un tiempo mayor al de falla prematura de la contención por by-pass de la barrera. Aún queda por estudiar el desempeño de una barrera compuesta totalmente por alúmina, por una mezcla de ambos materiales y con placas de sacrificio de renio.

Sin embargo, la interacción del núcleo fundido con otros materiales es un fenómeno difícil de predecir y se encuentra actualmente en desarrollo. Es por esto que no se considera finalizada la selección de materiales con los cuales construir esta barrera.

Durante el transcurso de este trabajo se ha adquirido experiencia interpersonal y laboral, al interactuar con el personal de los distintos departamentos de NA-SA, para intercambiar ideas sobre los proyectos aquí mencionados. Se destaca la interacción con los grupos de Ingeniería Civil y Análisis Determinísticos de Seguridad de NA-SA y el CIMEC de la Universidad Nacional del Litoral. Además, se han entablado comunicaciones con proveedores nacionales e internacionales, para adquirir información técnica de productos comerciales.

Finalmente, los resultados obtenidos en este trabajo han permitido el inicio y avance de proyectos que actualmente son gerenciados por NA-SA.

Anexo A Programas desarrollados en lenguaje MATLAB

A continuación se explicarán las bases del funcionamiento de los programas utilizados para crear las funciones de aproximación a los datos recopilados durante la aplicación de las metodologías descritas en este trabajo. Estos programas fueron escritos en el lenguaje MATLAB.

A.1 linfit4.m

Con este programa se calculan, a partir de cuadrados mínimos, los coeficientes de las funciones de aproximación a un set de datos. Para aproximar los datos se ha elegido utilizar polinomios. Con la configuración utilizada de este programa para la aplicación de la metodologías desarrolladas en este trabajo, el polinomio de aproximación que resulta de este programa es aquel que tenga asociado el mayor r cuadrado ajustado.

El r cuadrado ajustado es calculado a partir de

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 1} \quad (1)$$

en donde R es el r cuadrado convencional, n es el número de datos a aproximar y k es el grado del polinomio.

A.2 selectfit4.m

Con este programa, se busca encontrar la mejor combinación de curvas de tendencia que aproximen a un set de datos. La elección de la mejor curva de tendencia se realiza a partir del r cuadrado ajustado.

Para esto, primero se buscan aquellos puntos cuya diferencia sea menor a un 0,5 %. En este caso, la curva de aproximación entre estos puntos se tomará como una constante de valor dado por el promedio entre estos puntos. En caso contrario, en los intervalos en los que esta condición no se cumpla, se utilizará una curva de tendencia obtenida con el programa "linfit4.m".

Para mantener la veracidad del comportamiento de las propiedades con la temperatura (las propiedades de materiales analizadas en este trabajo tienen un comportamiento monótonamente decreciente con el incremento de la temperatura), en los casos en donde el resultado de linfit4.m implique un polinomio que involucre un incremento de la propiedad al avanzar en temperatura, se reemplaza en ese rango de temperaturas el polinomio por una función lineal que una los datos.

La salida de selectfit4.m son dos matrices en las que se indican los coeficientes de los polinomios de aproximación en una y los intervalos en los que se aplican las diferentes curvas de tendencia, junto con el grado del polinomio de cada curva y su valor de r cuadrado ajustado, en la otra.

Anexo B Resultados del programa selectfit4.m sobre datos de metodología

En esta sección se resumen los resultados obtenidos a partir de la aplicación del programa selectfit4.m, sobre los datos de las propiedades tratadas en las metodologías de estimación de propiedades mecánicas, elásticas y físicas. En cada tabla se designa el material al que pertenece la propiedad, cuyos datos fueron aproximados a partir del polinomio de coeficientes allí mostrados y que es aplicado en el rango de temperaturas detallado al final de la misma.

Material	Propiedad	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$T_{m\acute{a}x.} (^{\circ}C)$	$T_{m\acute{a}x.} (^{\circ}C)$
SA-479 302	$Rp_{0,2}$	224,5422	-0,7638	0,026	-4,8201E-6	3,4456E-9	25	350
	UTS	523,1572	-0,1588	-0,0034	1,0831E-5	-	25	200
		462	-0,1	-	-	-	200	250
		437	-	-	-	-	250	350
SA-479 304L	$Rp_{0,2}$	181,5857	-0,3872	1,1531E-4	2,2878E-6	-3,6208E-9	25	350
X5 CrNi 18 9	E	202.116	-0.0844	2.2929E-5	-	-	25	350

Tabla 1: Coeficientes de polinomios de aproximación a los datos de materiales similares para resolución de componente de material X5 CrNi 18 9. El índice i de los coeficientes a_i indica la potencia en la variable.

Material	Propiedad	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	$T_{m\acute{a}x.} (^{\circ}C)$	$T_{m\acute{a}x.} (^{\circ}C)$
SA-351	$Rp_{0,2}$	313.5326	-0.8752	0.0021	3.5302E-6	-2.7249E-8	3.6219E-11	25	350
	UTS	588	-0.08	-	-	-	-	25	100
		550.8374	2.0702	-0.0303	1.5832E-4	-3.6915E-7	3.222E-10	100	350
SA-995	$Rp_{0,2}$	492.9367	-1.9585	-0.0067	-8.1407E-6	-	-	25	350
	UTS	656	-0.04	-	-	-	-	25	100
		566.4717	5.1991	-0.0762	4.2054E-4	-1.0202E-6	9.1544E-10	100	200
		583	-	-	-	-	-	200	300
		601	-0.06	-	-	-	-	300	350

Tabla 2: Coeficientes de polinomios de aproximación a los datos de materiales similares para resolución de componente de material GX-5 CrNiMnMoN 21 11. El índice i de los coeficientes a_i indica la potencia en la variable.

Material	Propiedad	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	$T_{m\acute{a}x.} (^{\circ}C)$	$T_{m\acute{a}x.} (^{\circ}C)$
16 Mo 3	$Rp_{0,2}$	265,9299	-0,231	-3,7047E-4	5.2402E-06	-1.5070E-08	1.3283E-11	25	200
16 Mo 3	UTS	450	-	-	-	-	-	25	350
15 Mo 3	CT	49,2793	-0,0107	-2,4545E-5	-	-	-	25	350

Tabla 3: Coeficientes de polinomios de aproximación a los datos de materiales similares para resolución de componente de material 15 Mo 3. El índice i de los coeficientes a_i indica la potencia en la variable.

Anexo C Extrapolación de propiedades de materiales de barrera anti-derrame

Según la ecuación (11) de la sección 6 de la **Parte III**, la velocidad de cambio de temperatura aumenta con el aumento de la conductividad térmica y con la disminución de la capacidad calorífica del material que compone la barrera. Es por esto que durante la extrapolación de las propiedades térmicas a temperaturas a las cuales no se conocen datos de referencia, se tomó un criterio conservador mediante el cual se priorizan aquellas tendencias que en el rango de temperaturas a extrapolar, maximizan la conductividad térmica y minimizan la capacidad calorífica.

Para obtener las funciones de extrapolación se extrajeron los datos de las fuentes de cada propiedad y material. Con estos datos se crearon funciones de aproximación a los mismos a partir de tres modelos distintos, con el software Origin Lab:

$$f1(X) = A + Be^{CX} \quad (2)$$

$$f2(X) = A - B \ln(X + C) \quad (3)$$

$$f3(X) = A + BX^C \quad (4)$$

Una vez obtenidas las funciones de aproximación que cumplieran con el criterio mencionado anteriormente, se extrapolaron sus tendencias hasta un valor de temperatura homóloga del material de 0,8 (2000 °C para ZrO_2 , 1600 °C para Al_2O_3 y 1900 °C para el Re). Para temperaturas mayores se tomó como valor de la propiedad, el último valor correspondiente a la función de extrapolación a esa temperatura, extendiéndose de manera constante hasta los 2500 °C. Esto se debe a que se considera que para temperaturas mayores, no se puede asegurar que se cumpla el modelo aplicado para cada propiedad. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

C.1 Extrapolación de datos de material zirconia (ZrO_2)

A partir de la información provista por la empresa Zircoa se armaron las funciones de aproximación para las dos propiedades. En la **Fig. 1**, la función (2) es “exp”, la (3) es “log” y la (4) es “power”. Para el caso de la conductividad térmica no se encontró una función del tipo (4) que aproxime de manera adecuada a los datos.

Siguiendo el criterio conservador se tomaron las curvas del tipo logarítmica para la conductividad térmica y del tipo exponencial para el calor específico. En la **Tabla 4** se muestran los valores de los coeficientes de estas funciones.

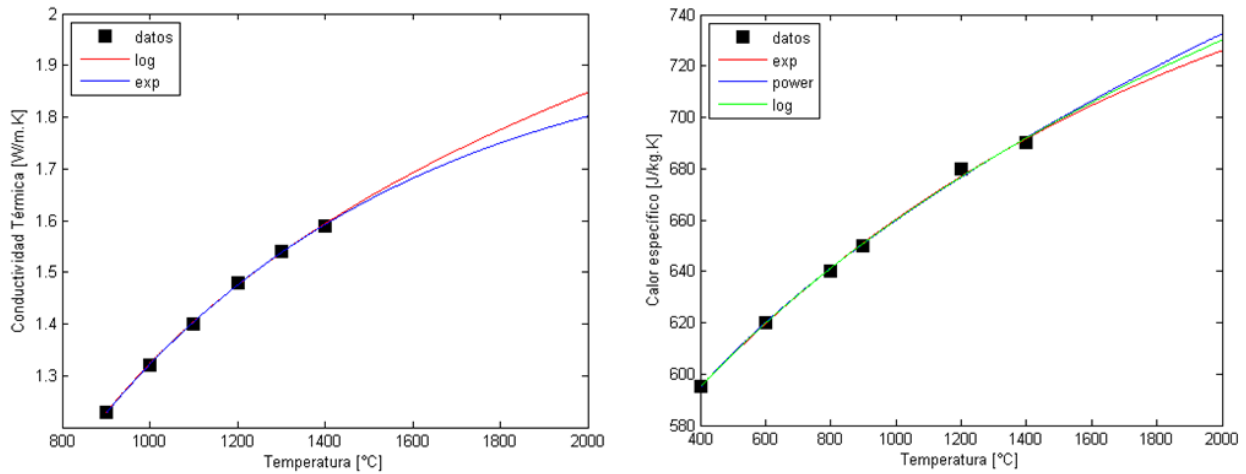


Fig. 1: Funciones de extrapolación de propiedades de material ZrO_2 .

Propiedad	A	B	C
Conductividad térmica	-2.29172	-0.55912	-357.88043
Calor específico	798.72025	-263.756	-6.43868E-4

Tabla 4: Coeficientes de funciones de aproximación a los datos de cada propiedad de material ZrO_2 .

C.2 Extrapolación de datos de material alúmina (Al_2O_3)

Dado que la información encontrada del calor específico alcanza la temperatura homóloga de este material, no fue necesario realizar el análisis de extrapolación para esta propiedad. La información encontrada de la conductividad térmica para este material presenta cierta dispersión. Siguiendo el criterio conservador se tomaron los datos correspondientes al upper bound de los comportamientos.

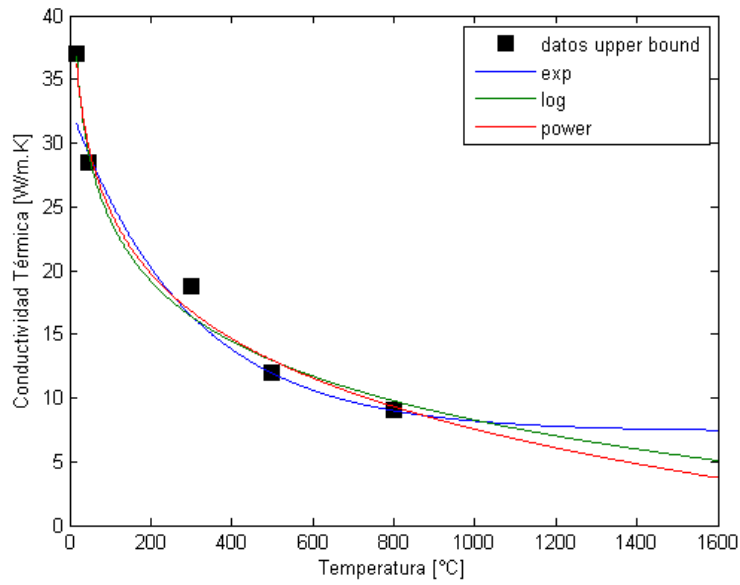


Fig. 2: Funciones de extrapolación de propiedades de material Al_2O_3 .

Para este caso, la función que maximiza la conductividad térmica en el rango de temperaturas a extrapolar según la **Fig. 2** es la función del tipo exponencial. En la **Tabla 5** se muestran los coeficientes para esta función de aproximación.

Propiedad	A	B	C
Conductividad térmica	7.3702	28.5863	-0.00344

Tabla 5: Coeficientes de funciones de aproximación a los datos de conductividad térmica de Al_2O_3 .

C.3 Extrapolación de datos de material renio (Re)

La información encontrada de este material no alcanza los 2500 °C, sino que para ambas propiedades la temperatura máxima conocida es de 2230 °C. Dado que la información encontrada para la capacidad calorífica se presenta en forma de ecuación y que la máxima temperatura de aplicación de la misma supera la temperatura homóloga del material, se tomó el valor conocido a esta temperatura y se extendió de manera constante hasta los 2500 °C. A partir de los valores encontrados para la conductividad térmica se crearon funciones de interpolación a estos datos. Siguiendo el criterio conservador, se observa de la **Fig. 3** que la función más adecuada para extrapolar los datos es la del tipo exponencial, cuyos coeficientes se muestran en la **Tabla 6**.

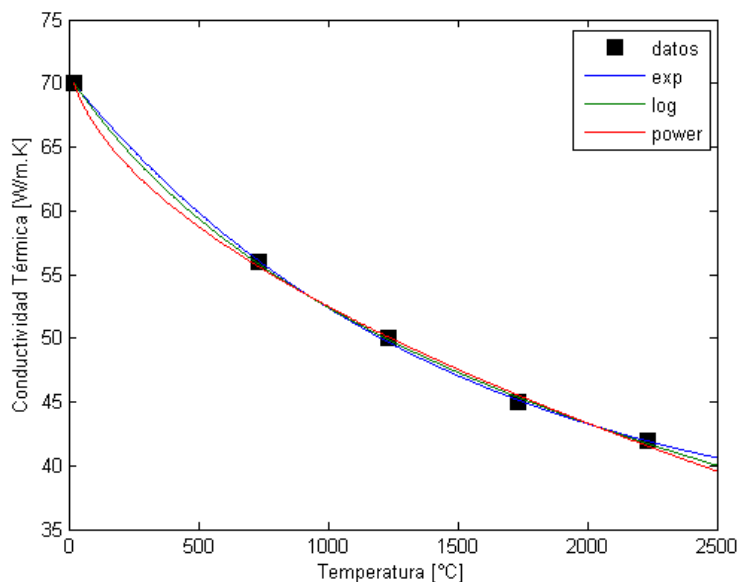


Fig. 3: Funciones de extrapolación de conductividad térmica de renio.

Propiedad	A	B	C
Conductividad térmica	34.04127	36.43355	-6.84688E-4

Tabla 6: Coeficientes de funciones de aproximación a los datos de conductividad térmica de renio.

Referencias

- [1] *Central Nuclear con Reactor de Agua Pesada, Kraftwerk Union AG, 1982.*
- [2] *<http://www.na-sa.com.ar/centrales-nucleares/embalse/>, 2020.*
- [3] *Long Term Operation - Structures and Structural Components, A Publication of the Extrabudgetary Programme on Safety Aspects of Long Term Operation of Water Moderated Reactors, IAEA, 2006.*
- [4] *NA-SA, IT-GI-SPEV-CNAI-20-2018-Rev.1, Metodología para el análisis de tensiones y fatiga para el período de extensión de vida de CNAI, 2018.*
- [5] *NA-SA, NT-GI-DM-6/2019, Propiedades mecánicas a aplicar al proyecto de Stress&Fatigue, 2019.*
- [6] *NA-SA, IT-GI-SPEV-CNAI-03-2019-Rev. 0, Determinación del alcance de los sistemas y componentes de CNAI para el análisis del proyecto para el período de extensión de vida, 2016.*
- [7] *NA-SA, DG-GI-SPEV-CNAI-13-2016-Rev. 0, Tabla, Lista de materiales NA-SA, 2016.*
- [8] *IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, IAEA, 2018*
- [9] *Analysis of Foreign and Domestic Material Specification for Ships Components, U.S. Department of Commerce, 1982.*
- [10] *Material Science and Engineering, William D. Callister Jr, David G Rethwisch, 9th. Edition, 2014.*
- [11] *Metals Handbook Desk Edition, Second Edition, ASM International, 1998.*
- [12] *Technischer Überwachungs-Verein Wien, Sachverständigen-Bescheinigung, 1969*
- [13] *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D, Properties (Metric), The American Society of Mechanical Engineers, 2015.*
- [14] *CNEA, IT-GMAT, Equivalencia de especificaciones de materiales del BOP de CNAI, Parte 1: chequeo general, 2017.*
- [15] *Materials Handbook for Nuclear Plant Pressure Boundary Applications (2015), Electric Power Research Institute, 2015.*
- [16] *Stainless Steel, Quality Specification, DIN, 1972.*
- [17] *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part A, Ferrous Material Specifications (SA-451 to End), The American Society of Mechanical Engineers, 2015.*
- [18] *Werkstoffprüfplan der Stahlwerke Bochum für die Spiralgehäuse des Kernkraftwerkes Atucha, RWTUV, 1969.*
- [19] *Technischer überwachungs - Verein Rheinland e.V.*
- [20] *Seamless Tubes of High-Temperature Steels, Quality Specifications for the Steels Used, DIN, 1959.*
- [21] *Seamless steel tubes for pressure purposes - Technical delivery conditions - Part 2: Non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties, European Standard, 2002.*

- [22] *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part A, Ferrous Material Specifications (Beginning to SA-450), The American Society of Mechanical Engineers, 2015.*
- [23] *Nuclear Power Reactor Core Melt Accidents, Chpt. 7, Lessons Learned from the Three Mile Island and Chernobyl Accidents and from the Phebus FP Research Programme, IRSN, 2015.*
- [24] *Preliminary Lessons Learned from the Fukushima Daiichi Accident for Advanced Nuclear Power Plant Technology Development, IAEA.*
- [25] *NA-SA, BN-NA-07-18, Posible modificación de la zona del sumidero para atrasar el contacto del corium con estructuras de la contención en caso de la falla del recipiente de presión durante un accidente severo, 2018.*
- [26] *Vincent Koundy, Cataldo Caroli, Laetitia Nicolas, Philippe Matheron, Jean-Marie Gentz-bittel, et al. Study of tearing behaviour of a PWR reactor pressure vessel lower head under severe accident loadings, Nuclear Engineering and Design, Elsevier, 2008.*
- [27] *U.S. EPR Final Safety Analysis Report, NRC, 2013.*
- [28] *ABWR Design Control Document, GE Nuclear Energy, 1997.*
- [29] *Christer N Dalhgren, Severe Accident Mitigation Features of the Economic Simplified Boiling Water Reactor, Hitachi Nuclear Energy, 2015.*
- [30] *State-of-the-Art Report on Molten Corium Concrete Interaction and Ex-Vessel Molten Core Coolability, NEA, 2017.*
- [31] *Molten Core Concrete Interactions in Nuclear Accidents Theory and Design of an Experimental Facility, VTT RESEARCH NOTES 2311, ESPOO, 2005.*
- [32] *Kyoung-Ho Kanga, Rae-Joon Park, Sang-Baik Kima, K.Y. Suhb, F.B. Cheungc, J.L. Remped, Simulant melt experiments on performance of the in-vessel core-catcher Nuclear Engineering and Design, 2007.*
- [33] *Keith G. Condie, Joy L. Rempe, Darrell Knudson, Kune Y. Suh, Fan-Bill Cheung, Sang-Baik Kim, Design and Evaluation of an Enhanced In-Vessel Core-Catcher, INEEL, 2004.*
- [34] *Andrea Quaini, Thermodynamic study of the in-vessel corium - Application to the corium/concrete interaction, Université Grenoble Alpes, 2015.*
- [35] *Analysis of Corium Recovery Concepts, EUROCORE Group, 2002.*
- [36] *Ing. Claudio Zocatelli, Comunicación interna NA-SA, 2020.*
- [37] *Boron Rich Solids, Sensors, Ultra High Temperature Ceramics, Thermoelectrics, Armor, Nina Orlovskaya, Mykola Lugovy, Springer, 2011.*
- [38] *MAX Phases and Ultra-High Temperature Ceramics for Extreme Environments, I. M. Low, Y. Sakka, C. F. Hu, Engineering Science Reference, 2013.*
- [39] *Core Melt Materials Interactions Evaluations, Annual Progress Report, Division of Systems Integration U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1980-1981*
- [40] *<https://nucleus.iaea.org>, 2020.*
- [41] *Luo Xiaoweia, Robin Jean-Charlesb, Yu Suyuana, Effect of temperature on graphite oxidation behavior, Nuclear Engineering and Design, 2004*
- [42] *J. Robert Kellya, Isabelle Denry, Stabilized zirconia as a structural ceramic: An overview, Dental Materials, 2008.*

- [43] *E. Curti, C. Degueldre, Solubility and hydrolysis of Zr oxides: a review and supplemental data, Radiochimica Acta 90, 801–804, 2002*
- [44] *https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/aluminum_oxide#section=Solubility, 2020.*
- [45] *ASM Handbook: Heat-Resistant Materials, ASM International, 1997.*
- [46] *Brian D. Reed, High-Temperature Oxidation Behavior of Iridium-Rhenium Alloys, NASA Technical Memorandum, 1994.*
- [47] *Steven J. Schneider, High Temperature Thruster Technology for Spacecraft Propulsion, NASA Technical Memorandum, 1991.*
- [48] *Len Schoenman, 4000°F Materials for Low-Thrust Rocket Engines, Journal of Propulsion and Power, 1995.*
- [49] *Antoni Gila, Marc Medranoa, Ingrid Martorella, Ana Lázaro, Pablo Dolado, Belén Zalbab, Luisa F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.*
- [50] *Sing Xiwen, Xie Min, Zhou Fen, Jia Guixiao, Hao Xihong, An Shengli, High-temperature thermal properties of yttria fully stabilized zirconia ceramics, Journal of Rare Earths, 2011.*
- [51] *David S. Smith, Sylvain Fayette, Sylvie Grandjean, Christian Martin, Thermal Resistance of Grain Boundaries in Alumina Ceramics and Refractories, Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle.*
- [52] *Robert Jansson McNamee, Measurement of Concrete Thermal Properties at High Temperature, 2004.*
- [53] *Comunicación con empresa Zircoa, 2020.*
- [54] *Pertti Auerkari, Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics”, VTT Manufacturing Technology, RESEARCH NOTES, 1792*
- [55] *Ultra-High Temperature Materials I Carbon (Graphene Graphite) and Refractory Metals”, Springer Netherlands, 2014.*