



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

SOLDADURA DE ALEACIONES ESPECIALES EN EL ÁREA NUCLEAR.

Ing. Carlos Muñoz^{*1-2}, Ing. José Talatinian^{*2-3}, Ing. Néstor Ferré^{**2}, Ing. Juan Carlos De Cabo^{*2}, Ing. F. R. Agüera^{*2-4}, Dr. Pablo Florido^{*1-5}, Ing. Roberto Cirimello^{*1-5}, Dr. Juan Bergallo^{*1-5}, Lic. Armando Marino^{*1-5}, Dr. Darío Delmastro^{*1-5}, Ing. Daniel Brasnarof^{*1-5}.

^{*1} Comisión Nacional de Energía Atómica – Gerencia Área Combustibles Nucleares, Unidad de Actividad Materiales y Combustibles Nucleares, Centro Atómico Ezeiza.

Av. Libertador 8250 CABA, Argentina
- e-mail: cmunoz@cae.cnea.gov.ar.

^{*2} Departamento Mecánica – Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires
Medrano 951 CABA, Argentina.

e-mail: cmunoz@secyt.utn.edu.ar

^{*3} Vitucci S.A. - Laboratorio de Soldadura – Departamento Mecánica – Universidad Tecnológica Nacional, Facultad regional Buenos Aires.

^{*4} Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas de las Fuerzas Armadas – Ministerio de Defensa. Villa Martelli Pcia. Bs. As.

^{*5} Comisión Nacional de Energía Atómica – Gerencia Área Combustibles Nucleares, Centro Atómico Bariloche Pcia de Río Negro.

Palabras Claves: Aleaciones de Zircaloy – 4. Soldadura. Combustibles Nucleares, Reactores Argentino.

Resumen

El Proyecto CARA (Combustible Avanzado para Reactores Argentinos) consiste en el desarrollo tecnológico nacional de un EC (elemento combustible) único para nuestros reactores nucleares de potencia de agua pesada (Atucha I, Embalse y Atucha II). El EC CARA tiene por objetivo mejorar el desempeño en dichos reactores manteniendo o mejorando las condiciones operativas y de seguridad de los mismos.

El diseño permite extender el quemado con buenos márgenes termohidráulicos empleando 52 barras combustibles de igual diámetro, y alcanzar valores negativos para el coeficiente de vacío mediante el empleo de uranio levemente enriquecido y venenos quemables. El manojito combustible se puede emplear directamente en la central de canales horizontales. Un sistema adicional de ensamble posibilita su uso en reactores PHWR de canales verticales.

La Universidad Tecnológica Nacional, facultad regional Buenos Aires, Departamento mecánica, acompaña a este proyecto específicamente en la caracterización de los materiales y evaluación de las propiedades mecánicas y realiza algunos ensayos puntuales

Se prevé que el empleo de uranio levemente enriquecido (ULE) en el EC CARA, para todos los reactores, provocará una importante reducción en el volumen de combustibles gastados a ser tratados, pudiéndose reducir estos entre un 17 a 27 % en Atucha I con respecto al actual ULE de 0.85%, una reducción entre el 38 al 46% para Embalse, y para Atucha II del 45 al 53%. La factibilidad mecánica para Atucha I y Embalse, junto con la compatibilidad hidráulica han sido verificadas.

1. INTRODUCCIÓN

Argentina tiene dos reactores de agua presurizada (PHWR) en operación (Atucha I y Embalse) desde 1974 y 1984 respectivamente, y otro en fase de construcción (Atucha II). Todos ellos están refrigerados con agua pesada y con uranio natural o ULE como combustible, y presentan diseños muy distintos. Embalse es un reactor CANDU 6 [1] estándar, con canales refrigerantes horizontales. Por otro lado Atucha I y II tienen un diseño Siemens de canales refrigerantes verticales dentro del recipiente de presión.

El EC de la central nuclear Embalse (CNE) tiene una longitud aproximada de 0,5 metros, y el canal de 6 metros se llena con doce de estos elementos. Atucha I y II por otro lado tiene un único EC de un poco más de 5 metros de longitud activa, soportado mecánicamente de su parte superior [2]. Los combustibles de Atucha I originalmente diseñados para Uranio natural tenían un quemado de extracción menor a 7000 MWd/tonUO₂ y, luego del programa de incremento de enriquecimiento, el combustible actual de Atucha I ha elevado el quemado de extracción hasta aproximadamente 11500 MWd/tonUO₂, empleando un enriquecimiento de 0,85 % de U²³⁵.

Esto ha mejorado la economía de la central en lo referente al costo de combustible y además ha permitido la reducción del número de elementos combustibles gastados, con el consiguiente ahorro en la ocupación de la piletta de decaimiento. Por otra parte, el diseño del EC Atucha II, que emplea Uranio natural, alcanza un quemado de extracción de 7500 MWd/tonUO₂.

El EC CARA [3,4,5] está siendo desarrollado por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) dentro del Programa Ciclo de Combustible. Se trata de un nuevo combustible para ser empleado en reactores de agua pesada de canales horizontales (Embalse) y verticales (Atucha), para mejorar sus desempeños. Dichas mejoras se basan en un claro objetivo económico con dos aristas.

2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA

El diseño del combustible CARA ha sido concebido para mantener las mismas condiciones operacionales de ambos reactores. Estas son el caudal refrigerante, la caída de presión en el canal, y la compatibilidad mecánica con la máquina de recambio tanto de los reactores de canales horizontales como verticales. Además, el diseño mejora el comportamiento con mayores márgenes termo hidráulicos y de seguridad empleando barras combustibles de un diámetro único, a diferencia de otros desarrollos que combinan barras combustibles de diferentes diámetros ⁽¹⁾, alcanzando coeficientes reactividad por vacío negativos empleando barras combustibles con ULE y otras con venenos quemables.

El elemento combustible CARA tiene 52 barras combustibles (colapsables en condiciones de operación) cercanas al metro de longitud (ver Figura 1) ubicadas en un arreglo compacto cilíndrico, sujetas por tres separadores elásticos autoportantes (ver Figuras 2 y 3) y soldadas en ambos extremos a dos grillas de baja obstrucción hidráulica (ver Figura 4). Las dimensiones y geometría se pueden observar en la Tabla I.



Figura 1. Prototipo de elemento combustible CARA.



Figura 2. 3^{er} prototipo separador elástico CARA.

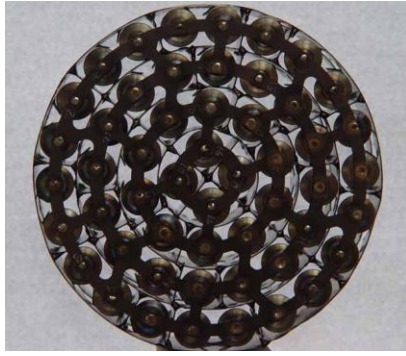


Figura 3. Vista frontal del separador Elástico CARA.

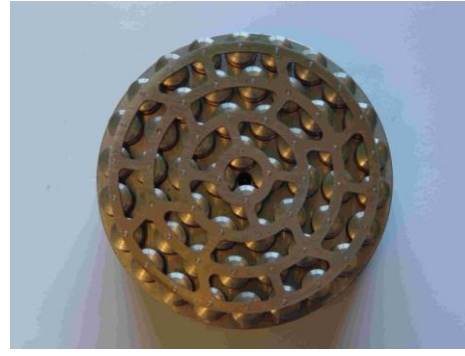


Figura 4. Grilla CARA.

Tabla I. Geometría y dimensiones del E. C. CARA

Geometría del elemento combustible	Cluster
Número de barras combustibles	52
Número de separadores elásticos	3
Longitud total	~1000 mm
Diámetro del elemento combustible	~103 mm
Diámetro externo vaina	< 11 mm
Espesor vaina	~0.35 mm
Diámetro de la pastilla	~10 mm
Longitud de la pastilla	~12 mm

El separador elástico autoportante está formado por cuatro flejes circulares concéntricos con travesaños radiales que los conectan, teniendo apoyos fijos y elásticos que fijan las barras en posición y sujetan al manojó. Desde el punto de vista mecánico los separadores elásticos mantienen las barras en su posición y reduce el pandeo del combustible, lo cual permite su inserción en canales verticales. La universidad realizó la evaluación de los puntos de apoyo de las barras combustibles, como así también los niveles de embutido y tetones con los que cuentan los separadores elástico de espesor reducido. Los canales combustibles en Atucha I son verticales y los elementos combustibles están sostenidos de la tapa superior del recipiente de presión. Para el uso del EC CARA en Atucha, es necesario unir 5 EECC CARA mediante el empleo de un sistema adicional de ensamble exterior, debiendo ser el extremo superior compatible con la máquina de recambio. Por dicho extremo se realiza la carga y posibilitaría, de estimarse económicamente conveniente, la reubicación axial en pileta de los elementos combustibles durante el recambio para mejorar el quemado.

En la Figura 5 se observa un diseño del sistema de ensamble compuesto por flejes. Para mantener los combustibles juntos, en el extremo inferior se encuentra un tope de baja impedancia hidráulica (Figura 6). En el extremo superior se emplea un dispositivo de acople con un resorte en un extremo que mantiene a los combustibles sujetos, mientras que en otro extremo de este dispositivo, hay un cuerpo de acople similar al de Atucha. Ello asegura su adaptabilidad con el diseño de Atucha I (ver Figura 7).

El sistema de ensamble posee 16 planos de soporte a lo largo de su longitud, cada uno de ellos con dos patines fijos y uno elástico para su apoyo con el canal.



Figura 5. Cuerpo del sistema de ensamble CARA.



Figura 6. Parte inferior del sistema de ensamble CARA.



Figura 7. Sistema de ensamblaje CARA completo para Atucha I.

3. COMPARACIÓN CON OTROS ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Para asegurar la compatibilidad con los combustibles de centrales de canales horizontales y verticales, se ha comparado el EC CARA tomando como base el segundo diseño de separadores y el sistema de ensamblaje para Atucha con los elementos combustibles de Atucha I, Atucha II y Embalse. La Tabla 2 muestra dicha compatibilidad donde, la menor longitud activa para el caso del EC CARA en Atucha, se compensa con una mayor densidad longitudinal de UO_2 frente al EC Atucha.

Tabla 2: Comparación de elementos combustibles

	Embalse	CARA Embalse	Atucha I	Atucha II	CARA Atucha
Masa Zry/ UO_2	~0.10	~0.10	~0.18	~0.15	~0.15
Masa UO_2 /Longitud [kg/m]	~43	~43	~33	~40	~43
Diámetro EC [mm]	~103	~103	~108	~108	~108
Peso [kg]	~47	~47	~210	~250	~250

El mayor tiempo dentro del reactor permite reducir el número de elementos consumidos por año de plena potencia. En la Tabla 3 se observan la cantidad de EC CARA necesarios para la operación de los diferentes reactores a plena potencia con un factor de carga del 100%. Entre paréntesis se presenta el consumo porcentual equivalente con respecto al número de EC consumido para la operación de Atucha I con ULE a 0.85%, Embalse con U natural y Atucha II con U natural. Para el caso de Atucha, 5 EC CARA equivalen a un EC Atucha, y para el caso de Embalse 2 EC de dicha central equivalen a un EC CARA.

Tabla 3: Consumo de EC CARA por año de operación a plena potencia con 100% de factor de carga.

Central	Quemado 14000 MWd/TonU
Atucha I	865 (73%)
Embalse	1528 (54%)
Atucha II	1542 (47%)
Total	3935

Desde el punto de vista económico, el diseño del EC CARA con venenos quemables permite una reducción (estimada en forma preliminar) entre el 8% al 15% frente a los actuales costos de frente de ciclo de los combustibles en las centrales argentinas. Este análisis económico se realizó en forma comparativa con respecto al EC Embalse, dada su gran similitud. En particular se consideraron los costos de fabricación, costos de uranio en función del enriquecimiento y las diferencias surgidas por el empleo de separadores elásticos y el sistema de ensamblaje para Atucha.

4. DESARROLLO DEL PROYECTO CARA

El proyecto se ha dividido en tres fases. La primera de ellas orientada hacia la viabilidad técnica, diseño e ingeniería de diferentes alternativas y fabricación de prototipos para ensayos hidráulicos. La segunda, que se encuentra en desarrollo, tiene por objetivo la validación de la viabilidad técnica basada en experimentos con realimentaciones surgidas de la fabricación y ensayos llevados a cabo en la primera fase. Por último, la tercera, donde se realizarán los ensayos de calificación y licenciamiento.

4.1. Primera Fase

En esta fase se desarrolló la ingeniería conceptual y básica del elemento combustible a partir de la comprobación experimental. Para ella, se emplearon combustibles con grillas desmontables para los ensayos hidráulicos de diferentes diseños de separadores (espesores, alturas y formas). En esta etapa se desarrolló en forma paralela la ingeniería de los elementos combustibles y diferentes sistemas de acople desarrollados para la introducción de este EC en la CN Atucha I.

4.2. Segunda Fase

En la segunda fase se desarrollaron los ensayos hidráulicos necesarios, tendientes a dar las respuestas a los planteos realizados y, comprobar el correcto funcionamiento de cada una de las partes. Se realizaron cinco prototipos de separadores con diferentes alturas, espesores y formas.

Se desarrollaron modelos de pérdida de carga validados experimentalmente para separadores, grillas y la fricción distribuida. Además se realizaron simulaciones numéricas empleando códigos comerciales de subcanales de geometría completa (COBRA HW) para el cálculo de flujo crítico de calor (CHF), adaptadas especialmente para modelar la geometría cluster, validados con datos experimentales de ensayos para el CANFLEX®, dentro de los rangos de operación del EC CARA. Se realizó el diseño de las barras combustibles empleando una secuencia de tres etapas con el código BACO a partir de la evaluación de casos extremos, estudios paramétricos y cálculos probabilísticos. Se determinaron las tolerancias de fabricación de vainas y pastillas a partir de métodos de diseño estadístico, cálculos de barra combustible (BC) en condiciones Embalse, Atucha I y comparación con irradiaciones disponibles.

Para el armado del elemento combustible actualmente se está desarrollando un nuevo método de soldadura debido al menor diámetro de barras del EC CARA con respecto al EC Embalse. La implementación de la soldadura por resistencia en el EC CARA ha presentado restricciones por las dimensiones que están involucradas. El nuevo método contempla el empleo de grilla de baja pérdida de carga que permite el posicionamiento, simple inspección de todas las soldaduras y la automatización del proceso. Se fabricaron prototipos de elementos combustibles con grillas desmontables para evaluación de comportamiento hidráulico de grillas y análisis vibratorio. Como paso siguiente se evaluará el comportamiento hidráulico en el circuito de baja presión del ensamble para Atucha. Se ha continuado con la caracterización mecánica de los separadores elásticos correspondientes al segundo prototipo.

Está en fase de desarrollo el concepto de separadores con insertos elásticos de Inconel para su empleo en combustibles ULE. Se incrementó la capacidad de cálculo del Código BACO con la inclusión de herramientas de elementos finitos para la optimización en detalle de la geometría de la pastilla combustible. Se ha ampliado la base de datos de irradiación como resultado del convenio con Halden. Se ha verificado la simulación del comportamiento de Barras Combustibles con el BACO para distintos reactores de potencia (PWR, BWR, CANDU, WWER) como resultado de la participación en el CRP-FUMEX II del OIEA [18].

5. BREVE DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO

5.1. Diseño Mecánico

Basado en la experiencia de las barras combustibles de Embalse, la barra combustible CARA se diseñó considerándola colapsable en condiciones de operación del reactor. Debido al menor diámetro del canal combustible de Embalse, el diámetro externo del elemento combustible CARA se fijó con esta restricción, mientras que la longitud máxima fue fijada tomando en cuenta la compatibilidad con la máquina de recambio de Embalse.

El combustible CARA tiene barras de menor diámetro que el combustible Embalse. Se ha diseñado una nueva unión soldada entre las barras y grillas con el propósito de tener una inspección completa y simple de cada soldadura, utilizando una grilla de baja impedancia hidráulica, de fácil ubicación y de absorción de tolerancias axiales durante el ensamblado [6], permitiendo además su automatización.

Se está desarrollando un nuevo diseño con tetones en el tapón de la barra combustible (ver Figura 8) para diferentes procesos de soldadura [7] (GTAW - LAW). En las Figuras 9 y 10 se muestran los prototipos de soldadura de la grilla CARA. Entre las actividades de desarrollo está la selección y ajuste de los parámetros

del proceso de soldadura y el desarrollo de la estación de soldadura para el ensamble combustible [8], actividades llevadas a cabo por personal de CNEA del Centro Atómico Ezeiza (CAE), Centro Atómico Constituyentes (CAC) y Centro Atómico Bariloche (CAB). En la figura 11 se observa la estación prototipo de soldadura para probetas tapón -vaina y para el conjunto combustible respectivamente.



Figura 8. Extremo Barra combustible CARA.



Figura 9. Grilla CARA.

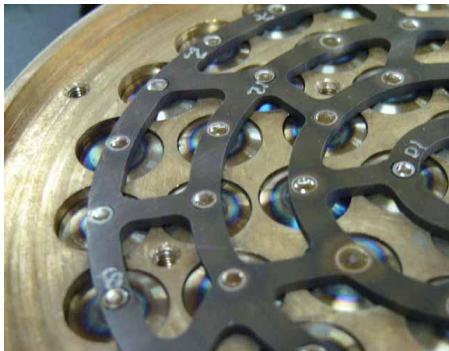


Figura 10. 1^{er} prototipo de soldadura de grilla CARA.

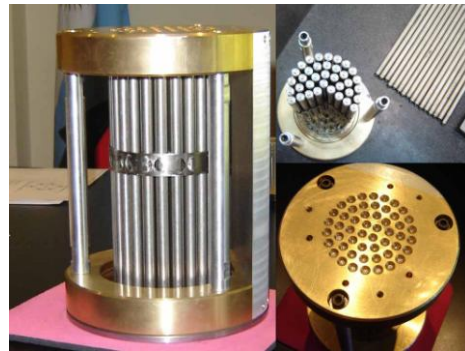


Figura 11. Estación de soldadura de desarrollo.

Como la barra combustible CARA ha sido diseñada para que la vaina colapse contra las pastillas en condiciones de operación, esto modifica las frecuencias naturales de las barras combustibles sin colapsar. Se realizaron estudios experimentales para ver la influencia de dicho fenómeno, empleando vainas de Zircaloy y diferentes pastillas metálicas, para simular el contacto con la vaina [9], observándose variaciones en las frecuencias de hasta un 30%.

5.2. Comportamiento Hidráulico

Una fracción importante de la caída de presión del combustible Embalse está concentrada en las grillas ($\approx 30\%$) [10]. El EC CARA reduce la impedancia hidráulica eliminando un par de grillas enfrentadas, y emplea esta ganancia para balancear el incremento de la fricción distribuida al tener un mayor número de barras. Por otra parte la eliminación de las grillas y los tapones da un crédito en volumen encapsulado para mantener la masa de uranio del elemento combustible con una menor sección de barra combustible, y por ende disminuir la fricción distribuida.

En el reactor Embalse, la columna de combustibles puede ser cargada en forma aleatoria con diferente orientación azimutal relativa. La impedancia hidráulica entre grillas enfrentadas presenta una dependencia con el ángulo de desalineación [11]. Se desarrolló un modelo para la pérdida de carga hidráulica en función del grado de desalineación [12], el cual ha sido verificado con datos propios y publicados [11]. La geometría particular del EC CARA ha sido evaluada con ensayos experimentales con dos prototipos en un circuito de baja presión empleando un canal horizontal tipo Embalse. Para el comportamiento hidráulico del separador se emplearon dos prototipos con grillas desmontables (ver Figura 12). Los ensayos hidráulicos se realizaron entre el 70% y el 130% del caudal nominal de Embalse en condiciones de baja presión y temperatura. Se ensayaron varios modelos, encontrándose un diseño que es compatible hidráulicamente en ambos reactores.

La caracterización hidráulica del ensamble CARA para Atucha (ver Figuras 13 y 14) está en progreso. Cálculos preliminares, empleando los modelos desarrollados y corroborados en forma experimental en el circuito de baja presión, muestran que la compatibilidad puede alcanzarse.



Figura 12. Prototipo cara con grillas desmontables.

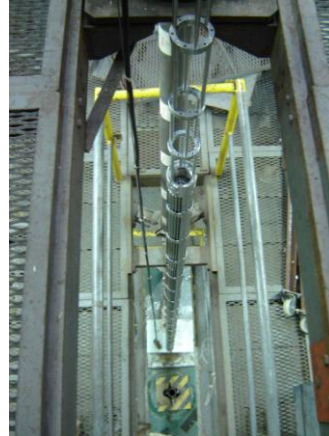


Figura 13. EC CARA Atucha.



Figura 14. Vista inferior del EC CARA Atucha.

5.3. Comportamiento de Flujo Critico

Uno de los principales aspectos dentro de los elementos combustibles es el comportamiento termohidráulico. Una manera de predecir ese aspecto del comportamiento en el EC CARA es mediante el empleo del código COBRA-IV [14]. Los márgenes de flujo crítico fueron calculados y validados [15] con datos experimentales de potencias de “dry-out” del EC CANFLEX®, llevados a cabo en el Laboratorio Stern [11] y modelados en geometría completa con el COBRA.

5.4. Comportamiento de Barra Combustible

El diseño de la barra combustible CARA se analizó con el código BACO, empleando análisis de casos extremos, cálculos paramétricos y estadísticos [16], para conocer la correcta incidencia de los parámetros del combustible y sus tolerancias de fabricación. La base de diseño de la barra combustible ha sido presentada previamente [5], donde historias de potencia hipotéticas pero realistas fueron definidas para la simulación con el código BACO [17], considerando las condiciones de irradiación de un elemento combustible en condiciones exigentes y reales. Además, la expansión lineal del CARA en Embalse se reduce al 25% del valor del combustible normal.

El aspecto característico del diseño del combustible CARA es su peculiaridad en cuanto a su colapsabilidad debido a la presión de llenado y el espesor de la vaina. Una vaina de un EC CANDU se encuentra lubricada internamente con grafito (o Canlub®) con el fin de reducir el PCI y el PCMI. En el CARA la reducción del diámetro de la BC y el empleo de un mayor número de barras por canal combustible, produce una disminución de la potencia lineal que, a su vez, implica una reducción de la temperatura de pastilla y de las deformaciones y tensiones.

Esto determina que en el CARA no sea necesario dicho recubrimiento.

El código BACO participa del CRP FUMEX II "Fuel Modelling at Extended Burnup" coordinado por el Organismo Internacional de Energía Atómica [18]. La participación en éste proyecto tiene como finalidad fortalecer el desarrollo de herramientas de evaluación de performance de barras combustibles (Código BACO) a ser utilizado por los proyectos CARA, CAREM y Atucha.

Para optimizar la geometría de la pastilla, se ha desarrollado el modelado de deformaciones 3D de pastillas a partir de la interacción del código BACO con herramientas 3D de elementos finitos [19]. Esto permite el estudio de la deformación termoelástica de la pastilla (análisis 3D del estado tensión-deformación de una pastilla bajo irradiación) y el análisis de los efectos de las fisuras entre otros. En las Figuras 15, 16 y 17 se observan algunos resultados de esta nueva versión del BACO para el estudio de efectos tridimensionales.

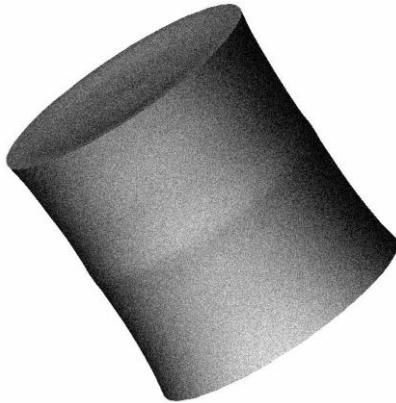


Figura 15. Perfil de una pastilla combustible calculada con BACO + 3D.

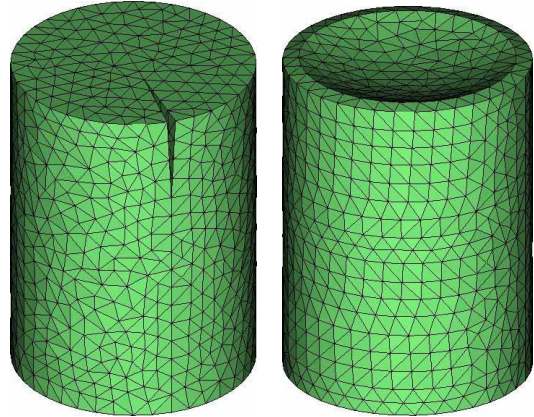


Figura 16. Ejemplos de mallas utilizadas para el cálculo 3D.

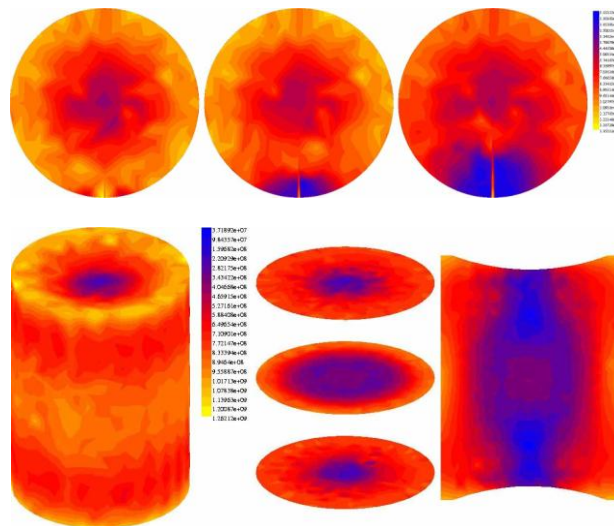


Figura 17. Resultados del cálculo de tensiones y deformaciones de una pastilla fisurada, y una con "dishing".

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado el estado actual de desarrollo del elemento combustible CARA, incluyéndose los criterios de diseño y la estrategia para lograrlo. La solución mecánica propuesta por el CARA es innovativa con respecto al combustible Embalse, permitiendo el uso de ULE para alcanzar quemados extendidos en los PHWR con buen comportamiento termohidráulico y, particularmente, empleando barras de diámetro único.

Diferentes prototipos del elemento combustible CARA han sido ensayados en el circuito de baja presión. Al emplear los modelos validados experimentalmente, se muestra que el CARA mantiene la similitud hidráulica en la CN Embalse. El sistema de ensamble externo posibilita su empleo en reactores de canales verticales comprobándose, además, su compatibilidad mecánica.

Por otra parte se ha verificado mediante el cálculo con modelos el buen comportamiento termohidráulico y termomecánico del CARA. Se ha empleado el código BACO para fijar los parámetros de diseño y tolerancia de las barras combustibles. Todos los componentes del CARA han sido diseñados y construidos para una primera realimentación general de diseño a partir de ensayos en circuitos de baja presión.

Los presentes resultados nos permiten decir en forma preliminar que el EC CARA puede satisfacer el desafío argentino: un único elemento combustible para dos tipos diferentes de centrales nucleares argentinas.

También se debe dejar claro que si existe voluntad política se puede trabajar en forma en mancomunada los institutos de investigación acompañados por las Universidades, como en este caso la UTN, frba, y un especial agradecimiento al Departamento Mecánica.

REFERENCIAS

1. Florido P.C, Cirimello R.O., Bergallo J.E., Marino A.C., Delmastro D.F., Brasnarof D.O., González J.H., Juanico L.E., *"CARA Design Criteria for HWR Fuel Burnup Extension"*, IAEA Technical Committee Meeting on Technical and Economic Limits to Fuel Burnup Extension, 15-19 Nov. 1999, Bariloche, Argentina, pp 129-140.
2. Brasnarof D.O., Troiani H., Marino A.C., Pelegrina J.L. Riquelme P., Muñoz C., Banchick D., *"Diseño y caracterización de la soldadura de unión entre barras combustibles nucleares y grillas estructurales de Zircaloy"*, Congreso Binacional SAM/CONAMET 2005, Mar del Plata, Argentina 18 al 21 de Octubre de 2005.
3. Banchick D., Muñoz C., Bianchi D., Sabio Calvet M., Samper R., Brasnarof D., *"Desarrollo de la soldadura en uniones entre tapones y grillas para combustibles nucleares de Zircaloy"*, Congreso Binacional SAM/CONAMET 2005 (Asociación Argentina de Materiales/Asociación Chilena de Metalurgia y Materiales), Mar del Plata, 18 al 21 de Octubre de 2005.