

## ANÁLISIS DINÁMICO DE LA MÁQUINA DE RECAMBIO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA II BAJO UN EVENTO SÍSMICO

Agustín Pecorari<sup>a</sup>, José Riso<sup>a</sup>, Alberto Cardona<sup>a</sup> y Adriana Politi<sup>b</sup>

<sup>a</sup>CIMEC, Predio CONICET Santa Fe, Colectora Ruta Nac 168 km 472,3000 Santa Fe, Argentina,  
<http://www.cimec.org.ar>

<sup>b</sup>Autoridad Regulatoria Nuclear, Av. del Libertador 8250, 1429 Ciudad Autónoma de Buenos Aires,  
Argentina, <http://www.arn.gov.ar>

**Palabras Clave:** Análisis Dinámico, MEF, RLE, Análisis Sísmico.

**Resumen.** La Central Nuclear Atucha II (CNA II) es un reactor de agua pesada presurizada (PHWR) que acaba de comenzar su operación. Se caracteriza por tener un sistema de recambio continuo de los elementos combustibles, con el reactor operando en condiciones normales de presión y temperatura. Dicha tarea es realizada por la máquina de recambio de elementos combustibles (MR), la cual cumple las funciones de recarga del reactor con nuevos elementos y de reubicación de los elementos combustibles en las diferentes zonas del reactor, conforme los mismos son irradiados.

Empleando el MEF se efectúa un análisis dinámico de la máquina de recambio de elementos combustibles, cuando la misma está acoplada a un canal combustible y se produce un sismo RLE (Review Level Earthquake) propuesto por el constructor de la central y aprobado por la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), con el objetivo de analizar el nivel de tensiones y deformaciones generadas en el canal combustible y su implicancia para la seguridad radiológica.

Como excitación del modelo de elementos finitos se utilizan historiales de desplazamiento en función del tiempo (Time Histories) en los puntos de apoyo de las vigas carrileras por donde se desplaza la MR y en el nivel superior del reactor, obtenidos mediante integración numérica de los historiales de aceleraciones en tales puntos provistos por el constructor de la central.

## 1 INTRODUCCIÓN

La máquina de recambio de elementos combustibles (MR) de la Central Nuclear Atucha II (CNA II) es el componente principal del sistema de recambio continuo de los elementos combustibles del reactor de agua pesada presurizada (PHWR). Sus funciones son la recarga continua del reactor con nuevos elementos, y la reubicación de los elementos combustibles en las diferentes zonas del reactor conforme los mismos son irradiados. Estas tareas se realizan con el reactor operando en condiciones normales de presión y temperatura.

A pedido de la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) se efectúa un análisis dinámico empleando el Método de Elementos Finitos (MEF) de la máquina de recambio de elementos combustibles acoplada a un canal combustible, durante un evento sísmico correspondiente al Review Level Earthquake (RLE) propuesto por el constructor de la central ([James J. Johnson and Associates, 2012](#)) y aprobado por la ARN, con el objetivo de analizar el nivel de tensiones y deformaciones generadas en el canal combustible y su implicancia para la seguridad radiológica.

El RLE es un evento sísmico con una probabilidad de ocurrencia de  $10^{-4}$  años y una aceleración máxima del terreno (PGA – peak ground acceleration, es decir el valor de aceleración espectral para frecuencias muy altas) de 0.10g ([Figura 1](#)).

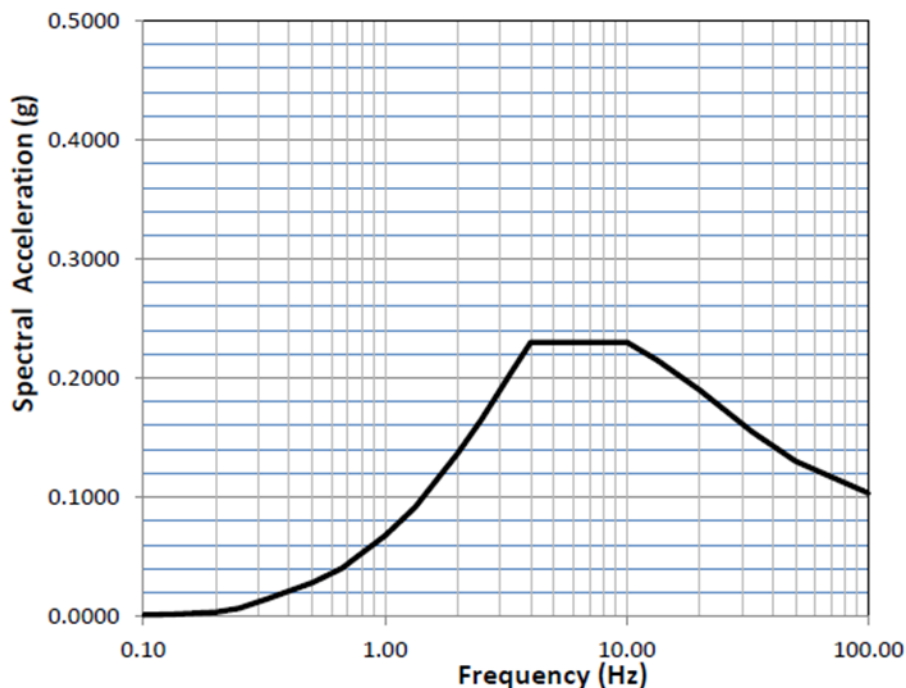


Figura 1 RLE de la CNA II

Como excitación del modelo de elementos finitos se utilizan historiales de desplazamiento en función del tiempo (Time Histories) en los puntos de apoyo de las vigas carrileras por donde se desplaza la MR con la estructura de hormigón armado (tal detalle se puede apreciar en la [Figura 2](#)) y en el nivel superior del reactor, obtenidos mediante integración numérica de los historiales de aceleraciones en tales puntos provistos por el constructor de la central.

Debido a la complejidad del análisis a realizar, el mismo se dividió en dos etapas. En la primera se modeló la MR con el canal combustible, suponiendo un comportamiento elástico del material, a los fines de obtener los desplazamientos diferenciales y la resultante de fuerzas en el sentido vertical sobre el canal combustible. En la segunda etapa, esos resultados se

utilizaron como datos para un modelo local del canal combustible, definiendo un material de comportamiento elastoplástico.

## 2 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO GLOBAL

Para realizar un análisis completo de las tensiones y deformaciones del sistema, se generó un modelo 3D utilizando una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD). El modelo desarrollado responde a la geometría “as built” de la MR y del canal combustible.

En la [Figura 2](#) se puede ver la MR en el recinto del reactor, así como también un apoyo de una viga carrilera por donde se desplaza la MR.



Figura 2 Máquina de recambio de elementos combustibles (fuente: <http://www.na-sa.com.ar>).

Para realizar el análisis, se seleccionó el canal combustible correspondiente al número 429 (posición AB45), al ser ésta una de las posiciones más desfavorables por tener este canal una longitud libre mayor al encontrarse en la periferia del reactor. En la [Figura 3](#) se puede ver la distinta longitud de los canales combustibles debido a la curvatura de la tapa del reactor.

También se realizó el análisis considerando la MR acoplada al canal combustible de menor longitud, el correspondiente al número 001 (posición AD23).



Figura 3 Recinto del Reactor: vista de los canales combustibles (fuente: <http://www.na-sa.com.ar>)

Las vigas carrileras y la estructura superior que sostiene a la máquina de carga se modelaron como estructuras de barras. El recipiente de presión y el tubo de blindaje se modelaron como cáscaras, mientras que el canal combustible y la boquilla del recipiente de presión de la máquina de carga se modelaron como sólidos. En la [Figura 4](#) se puede ver una vista general del modelo, y en la [Figura 5](#) se ve la boquilla de la MR y el canal combustible por separado, y luego en la posición de acople.

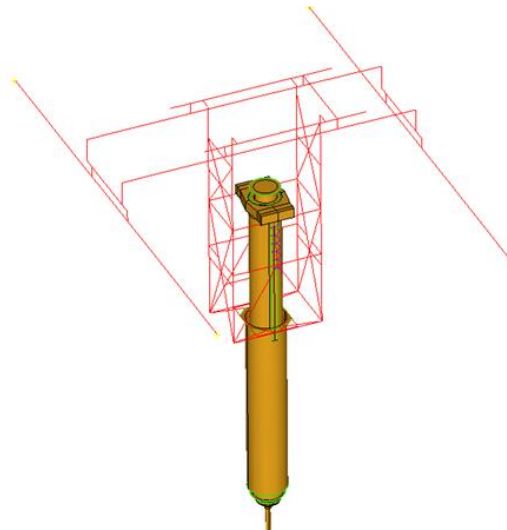


Figura 4 Vista general del Modelo en Elementos Finitos de la MR



Figura 5 Vista de la boquilla de la MR y el canal combustible AB45

## 2.1 Modelo de Elementos Finitos

El modelo geométrico generado mediante CAD fue importado en [SAMCEF Field \(2013\)](#), programa con el cual se realiza el análisis dinámico.

Una vez cargada la geometría en SAMCEF Field, se asignaron los siguientes parámetros que definen al modelo en su totalidad:

- **Materiales:** Se adoptó como material para toda la MR acero ferrítico, y para el canal combustible acero 20MnMoNi55, suponiendo un comportamiento elástico lineal. Para una temperatura de 350°, el valor de la tensión de fluencia del acero 20MnMoNi55 es de 350 MPa.
- **Comportamientos:** Se definieron las vigas (con secciones y momentos de inercia), cáscaras (con sus espesores), y sólidos que representan a los componentes estructurales.
- **Condiciones de contorno:** desplazamientos impuestos en función del tiempo y cargas gravitatorias.
- **Vínculos entre estructuras y contactos entre piezas.**

Los ejes globales se definieron de la siguiente manera: el eje X corresponde a la dirección 90°-270° del Reactor, el eje Z corresponde a la dirección 0°-180° y el eje Y corresponde a la dirección vertical.

## 2.2 Condiciones de borde

Las condiciones de borde impuestas al modelo en SAMCEF Field corresponden a los historiales de desplazamientos impuestos (en las tres direcciones de ejes coordenados), generados por el RLE. Dichos desplazamientos se impusieron en los extremos de las vigas carrileras y en la base del canal combustible.



El input sísmico fue obtenido a través de integración numérica consistente (ver [Wilson Edward, 1995](#)) en función de los historiales de aceleraciones que fueran calculados para esos puntos por [James J. Johnson and Associates \(2013\)](#) y facilitados por el constructor de la central. A los historiales de desplazamientos así obtenidos se les aplicó una corrección de línea base mediante mínimos cuadrados para cada dirección, considerando que la integral de los desplazamientos en el tiempo es nula, y que los desplazamientos iniciales también son nulos.

Los historiales de aceleraciones empleados para obtener los historiales de desplazamientos, son los correspondientes a la mejor estimación de los parámetros del suelo.

Al imponer en el modelo los desplazamientos generados por el RLE en función del tiempo, las únicas cargas que actúan simultáneamente a éstos, y que fueran debidamente tenidas en cuenta, son las cargas generadas por el peso propio del modelo.

En la [Figura 6](#) se muestran los nodos donde se impusieron los desplazamientos, y a modo de ejemplo se muestra uno de los historiales de desplazamientos.

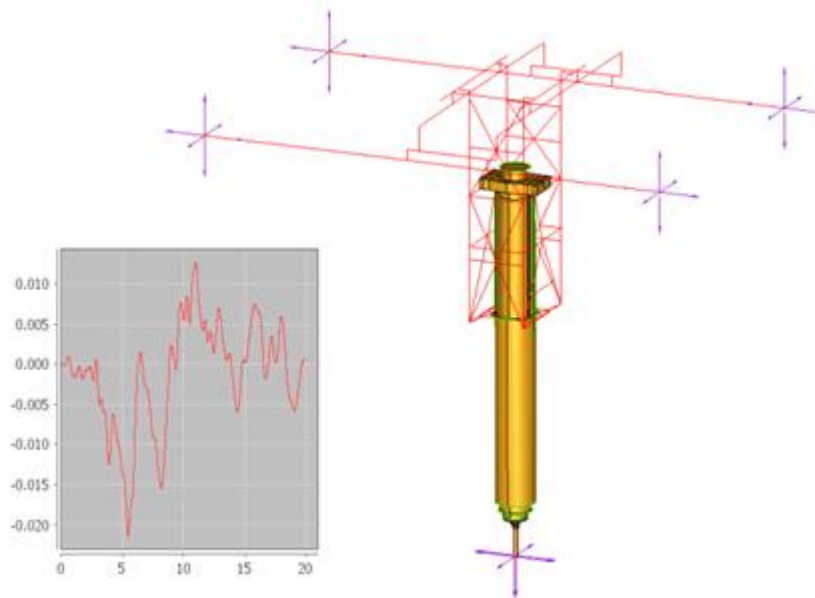


Figura 6 Nodos de imposición de desplazamientos

### 2.3 Vinculaciones y contactos

Se definieron condiciones de contacto flexible entre las superficies cilíndricas y laterales del canal de elementos combustibles y sus superficies homólogas en la boquilla de la MR; y entre la superficie superior del canal de elementos combustibles y su superficie homóloga en la boquilla de la MR. A causa de estos contactos, queda restringido el desplazamiento relativo entre ambas piezas, tanto en sentido radial como en sentido axial.

Para simplificar el modelo, y teniendo en cuenta que en los análisis preliminares las cargas en los apoyos resultaban siempre positivas (es decir que las ruedas nunca se despegaban del riel), las ruedas de la MR sobre la estructura vertical y sobre las vigas carrileras se modelaron como elementos de Junta Cilíndrica, incluyendo fricción ( $\mu=0.3$ ) en los pares de ruedas vinculadas al sistema de frenado de cada uno de los carros.

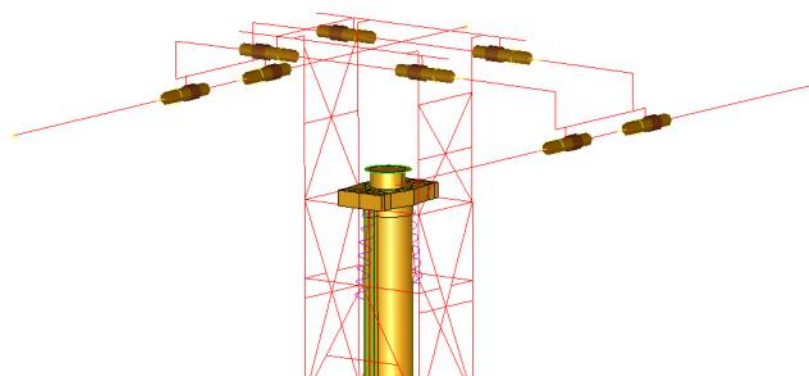


Figura 7 Vinculaciones de ruedas, representadas a través de juntas cilíndricas

## 2.4 Mallado del modelo

Siendo el objeto del estudio analizar la integridad del canal combustible y la boquilla de la MR, es en esa zona donde se realizó una malla con mayor densidad de elementos con el objetivo de que el error en el cálculo de deformaciones y tensiones originado por el MEF sea aceptable. En el resto del modelo, el tamaño de los elementos es progresivamente creciente a medida que nos alejamos de la zona de importancia del estudio, a fin de reducir el tiempo de cálculo.

La malla se compone de elementos de vigas, de cáscaras, sólidos (discretizados mediante tetraedros lineales) y juntas cinemáticas.

La discretización final del modelo está dada por 41795 nodos y 144594 elementos.

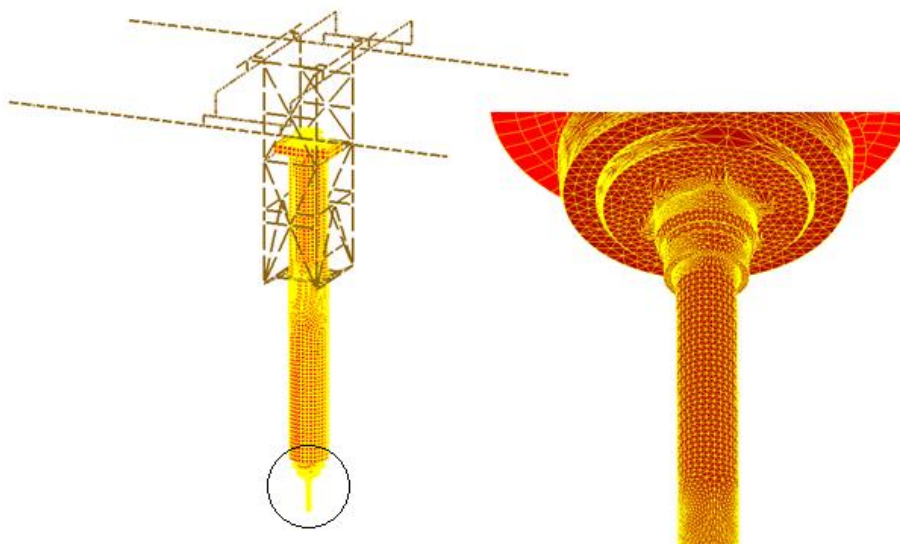


Figura 8 Mallado del modelo

## 2.5 Resultados para el canal combustible AB45

Se detallan a continuación los resultados del análisis efectuado para la posición en la cual la MR se encuentra acoplada al canal combustible más largo, de posición AB45.

En la [Figura 9](#) se presenta los desplazamientos calculados para el instante de tiempo en que se producen los máximos desplazamientos nodales.

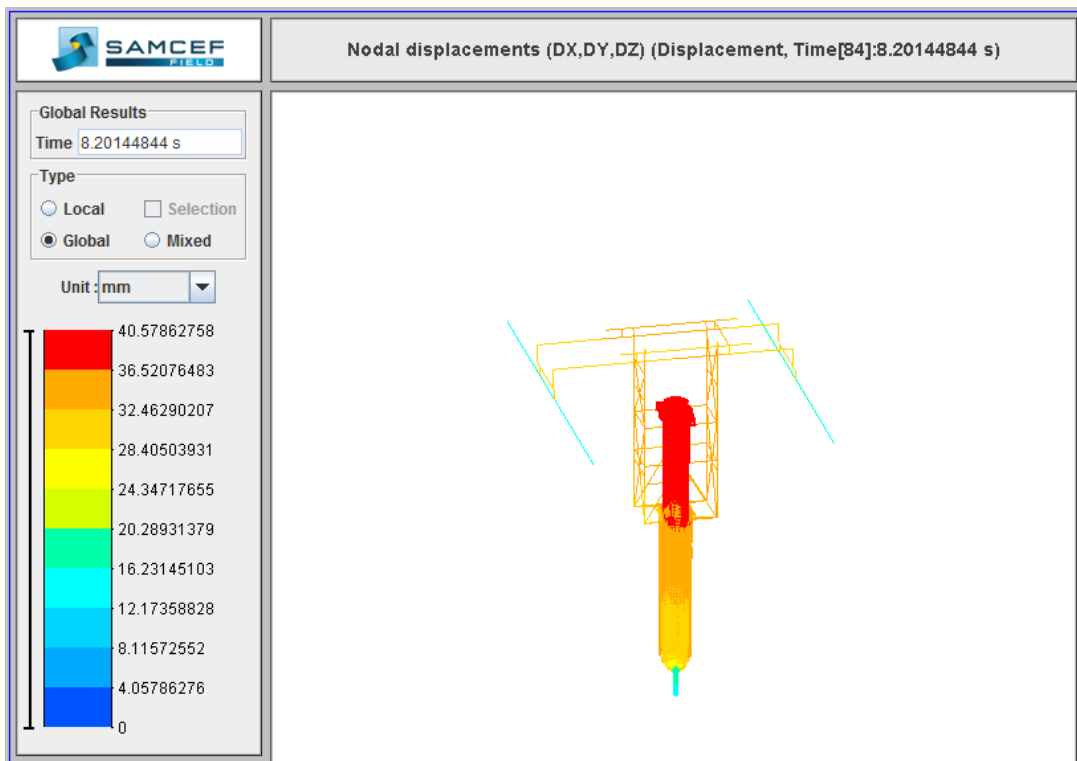


Figura 9 Desplazamientos nodales para un instante determinado

En la [Figura 10](#) y en la [Figura 11](#) se presentan los desplazamientos horizontales impuestos en la base del canal combustible superpuestos con los resultados de los desplazamientos calculados en la parte superior del Mantel (conector superior del canal combustible).

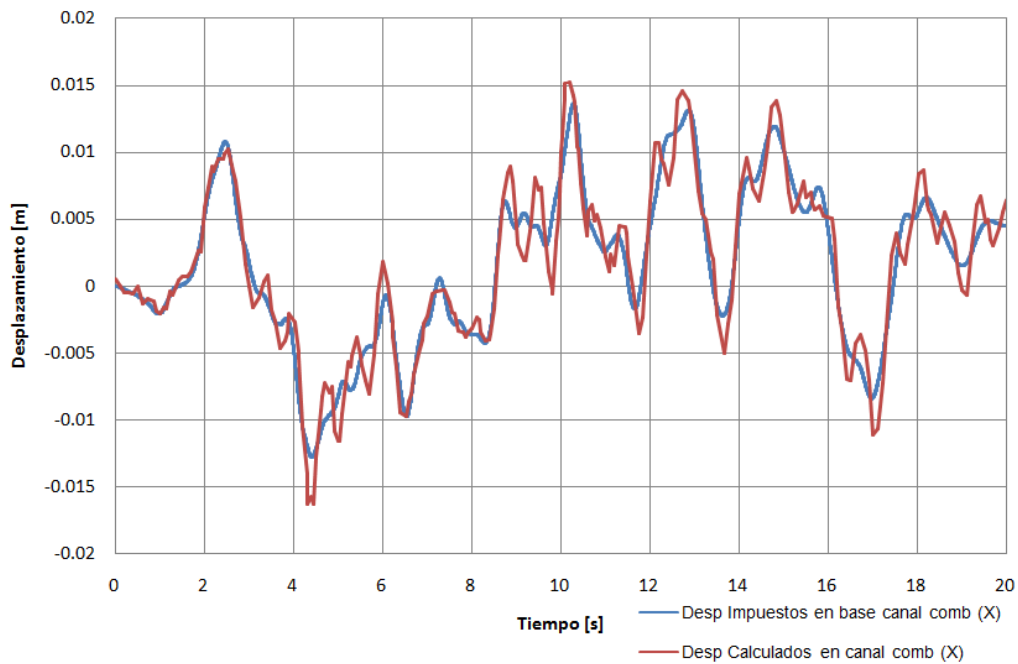


Figura 10 Desplazamientos Impuestos en la base del Canal Combustible y Calculados en el la parte superior del Canal Combustible (Dirección X)



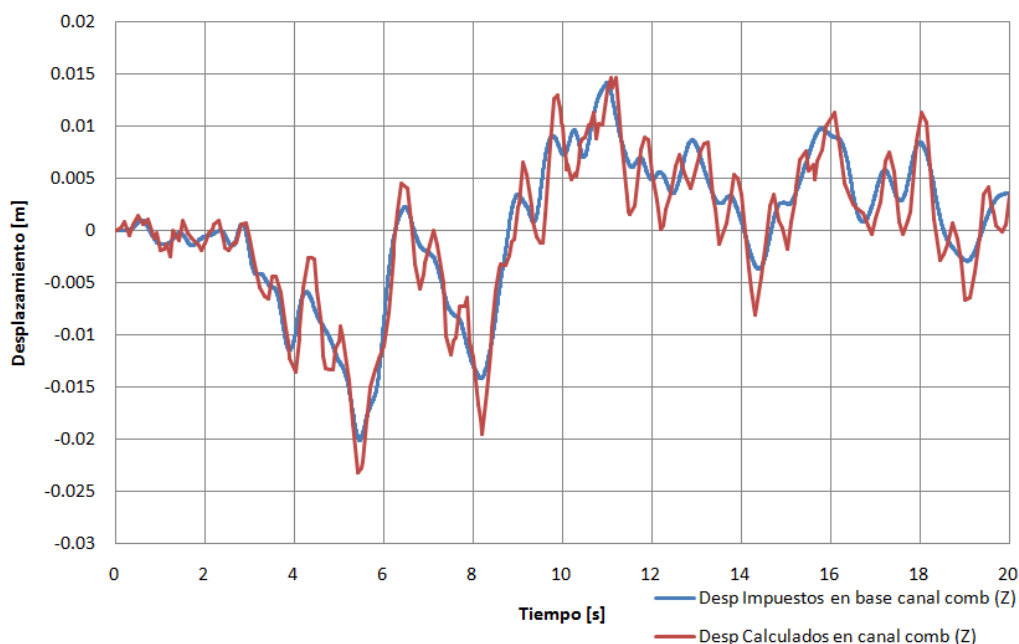


Figura 11 Desplazamientos Impuestos en la base del Canal Combustible y Calculados en la parte superior del canal combustible (Dirección Z)

En la [Figura 12](#) se aprecian los desplazamientos relativos entre la superficie superior del Mantel y la sección de unión del canal combustible con la tapa del reactor (en direcciones horizontales ortogonales). También se obtuvo la resultante en función del tiempo de las fuerzas en sentido vertical, aplicadas por la boquilla del recipiente de presión sobre el canal combustible (ver [Figura 13](#)). El valor de la carga sobre el canal combustible antes de la aparición de la excitación sísmica es de  $90t$ , lo cual está de acuerdo con el valor de diseño informado por el constructor.

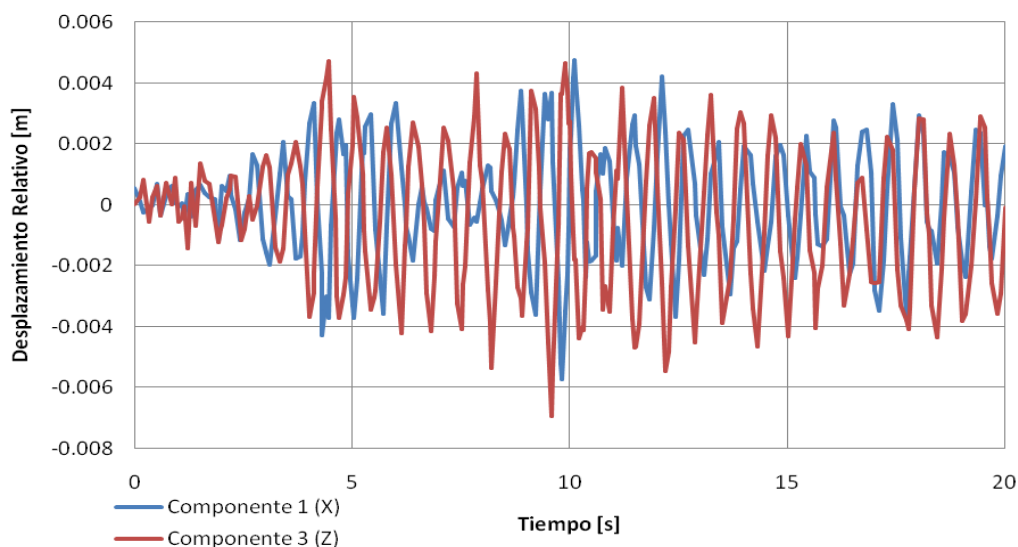


Figura 12 Desplazamientos Relativos entre el Mantel y la base del canal combustible

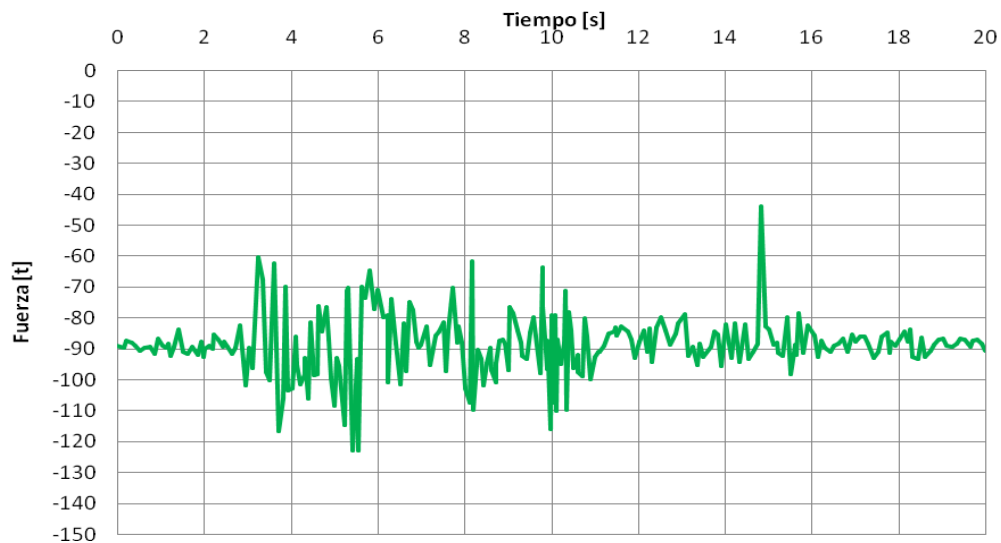


Figura 13 Resultante de Fuerza en sentido vertical (Y) entre la boquilla del recipiente de presión y el canal combustible

Una evaluación inicial de los resultados obtenidos con este modelo, indica que existirían zonas donde se superaría la tensión de fluencia del material del canal combustible. Para representar apropiadamente esta situación, es necesario utilizar un modelo de material elastoplástico, y una malla con mayor refinamiento en esas zonas. No obstante, la combinación del uso de un material elastoplástico y una malla con mayor cantidad de nodos, sobre un modelo estructural de análisis dinámico que involucra contactos y otras no linealidades, hubiera tenido un costo computacional demasiado elevado. Para superar esta dificultad, considerando que la rigidez del canal combustible no influye de manera significativa en los desplazamientos globales de la MR (habida cuenta de la gran masa de la misma), se propone estudiar el comportamiento del canal combustible a través del uso de un modelo reducido, que considere solamente la geometría del canal combustible y la boquilla, y donde las condiciones de contorno aplicadas sean los desplazamientos relativos entre el Mantel y la sección de unión del canal combustible con la tapa del reactor, y las fuerzas verticales ejercidas por el apoyo de la boquilla del recipiente de presión de la MR sobre el canal combustible, calculados mediante el modelo global descrito en la sección 2. Este modelo se describe a partir de la sección 3.

## 2.6 Resultados para el canal combustible AD23

Se detallan a continuación los resultados del análisis efectuado para la posición en la cual la MR se encuentra acoplada al canal combustible más corto, de posición AD23. En la [Figura 14](#), [Figura 15](#) y [Figura 16](#) se presentan resultados de tensiones para tres instantes de tiempo en donde se obtienen valores máximos en la zona del canal combustible.

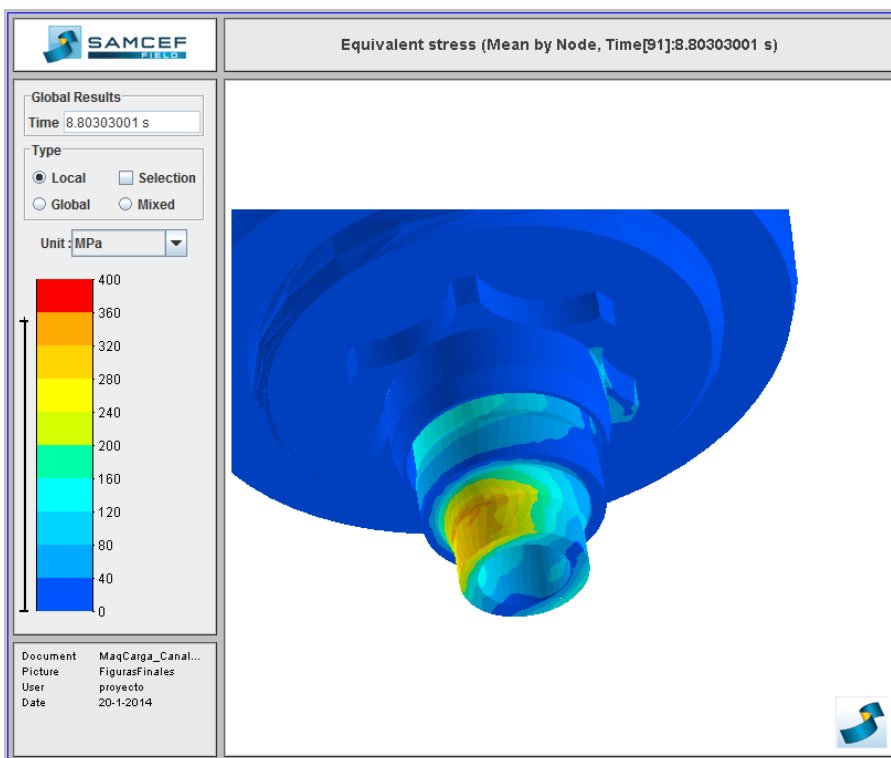


Figura 14 Tensiones para t = 8.80s

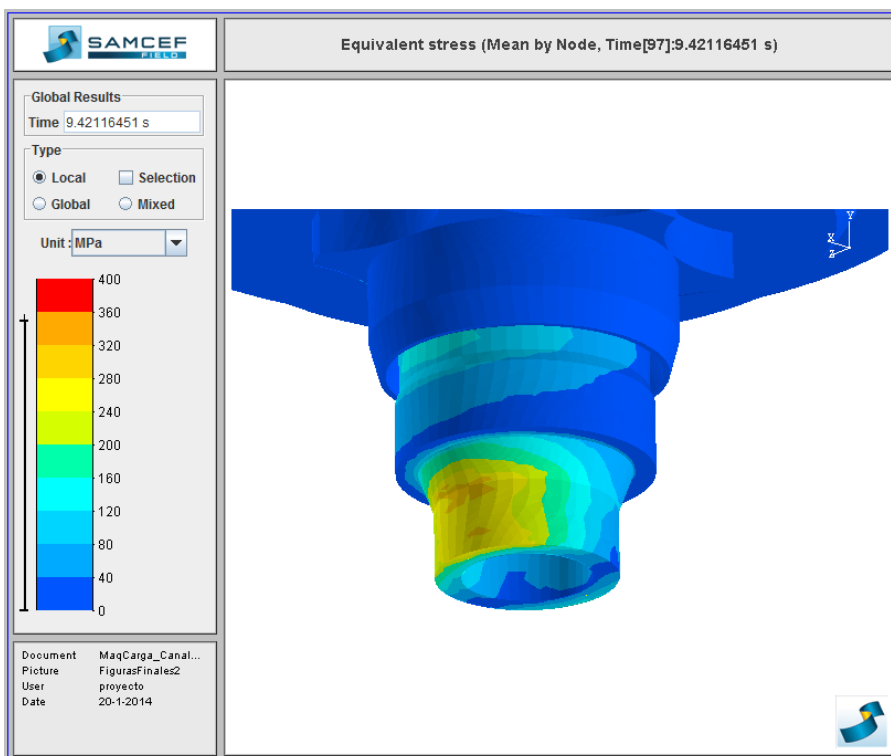


Figura 15 Tensiones para t = 9.42s

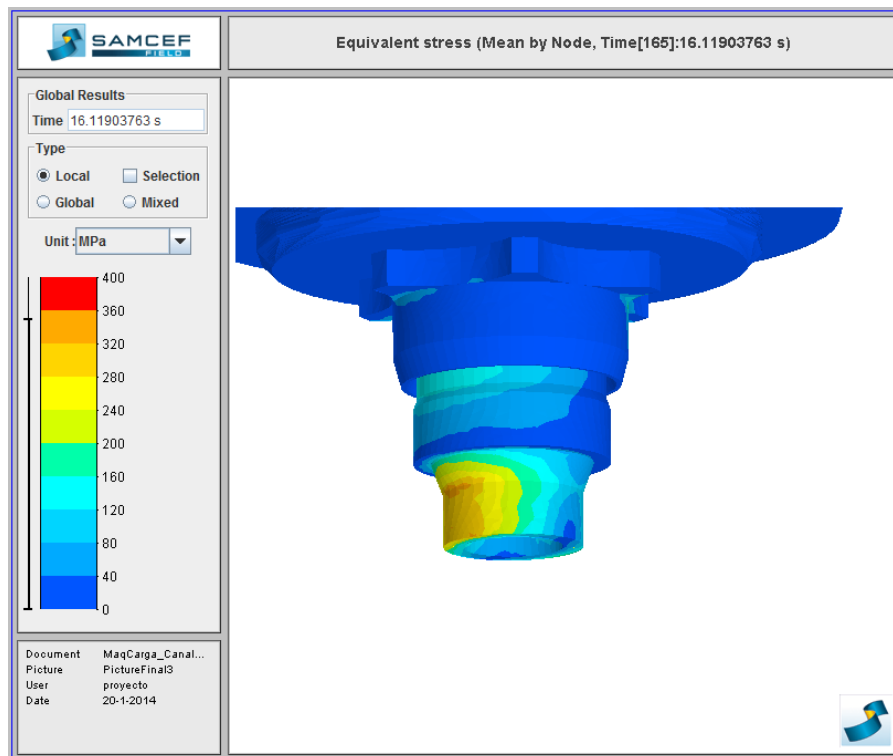


Figura 16 Tensiones para  $t = 16.12s$

Analizando la evolución de tensiones que se presentan a lo largo del evento sísmico en el canal combustible se puede apreciar que el valor de las tensiones se mantiene por debajo del valor de la tensión de fluencia del material, por lo que no estaría comprometida la integridad del canal combustible desde el punto de vista de la seguridad radiológica.

### 3 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DEL CANAL COMBUSTIBLE

El modelo consiste solamente en el canal combustible número 429 (posición AB45), al cual se le aplicaron como condiciones de contorno los desplazamientos de la tapa del reactor y los resultados de fuerzas y desplazamientos relativos en el Mantel, obtenidos mediante el modelo general de la MR.

Se asignaron los siguientes parámetros que definen al modelo:

- Material: Se le asignó al canal combustible el material 20MnMoNi55 de comportamiento elastoplástico. Se consideró una temperatura de  $350^{\circ}\text{C}$  (Figura 17).
- Comportamiento como sólido.
- Condiciones de contorno: Corresponden a los desplazamientos relativos en dos direcciones ortogonales en sentido horizontal entre el canal combustible y la boquilla de la MR, y a las fuerzas resultantes en dirección vertical generadas por la MR sobre el canal combustible. Se consideró al canal empotrado en su base.

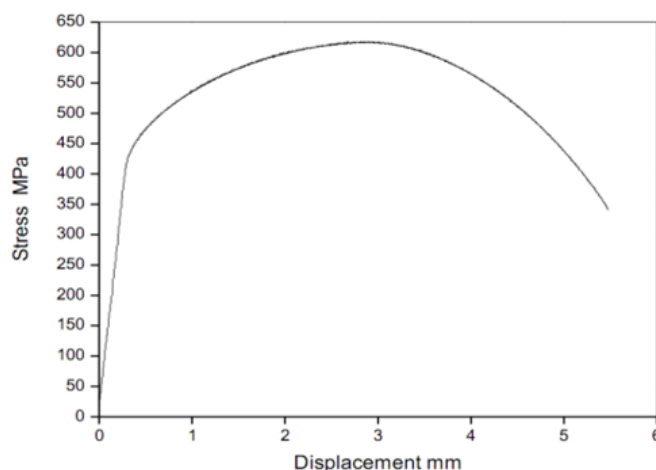


Figura 17 Gráfico Tensión-Desplazamientos de 20MnMoNi55 a 300°C. Los desplazamientos son entre mordazas, y corresponden aproximadamente 3mm  $\rightarrow$  10% (Aravind K., 2009)

Se eligió aplicar cargas en sentido vertical al canal combustible (y no desplazamientos relativos), porque debido a la elevada rigidez axial del canal combustible, pequeños errores en los desplazamientos relativos calculados mediante el modelo global de la MR hubieran provocado errores importantes en el cálculo de tensiones axiales. Estos errores distorsionarían los resultados globales, donde se superponen estas tensiones derivadas de la carga axial con las tensiones de flexión provocadas por los desplazamientos relativos aplicados en forma horizontal.

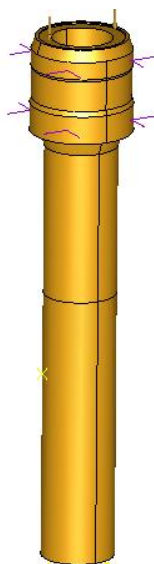


Figura 18 Vista general del Modelo del canal combustible y sus condiciones de contorno

### 3.1 Mallado del modelo

Se decidió utilizar una malla de tetraedros cuadráticos, a diferencia de los tetraedros lineales aplicados en el modelo general, a los fines de mejorar los resultados obtenidos.

La discretización final del modelo está dada por 29160 nodos y 16914 elementos, incluyendo un refinamiento local de la malla en la zona de tensiones máximas.

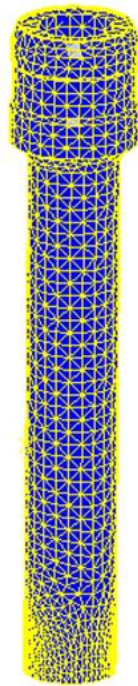


Figura 19 Mallado del canal combustible

### 3.2 Resultados

En la Figura 20 se presentan los máximos desplazamientos nodales. En la Figura 21 se aprecian resultados de tensiones para un instante determinado, y en la Figura 22 las deformaciones plásticas acumuladas al final del análisis. Se observa que la deformación plástica se concentra en el empotramiento, y que la misma se encuentra por debajo del 1,4%.

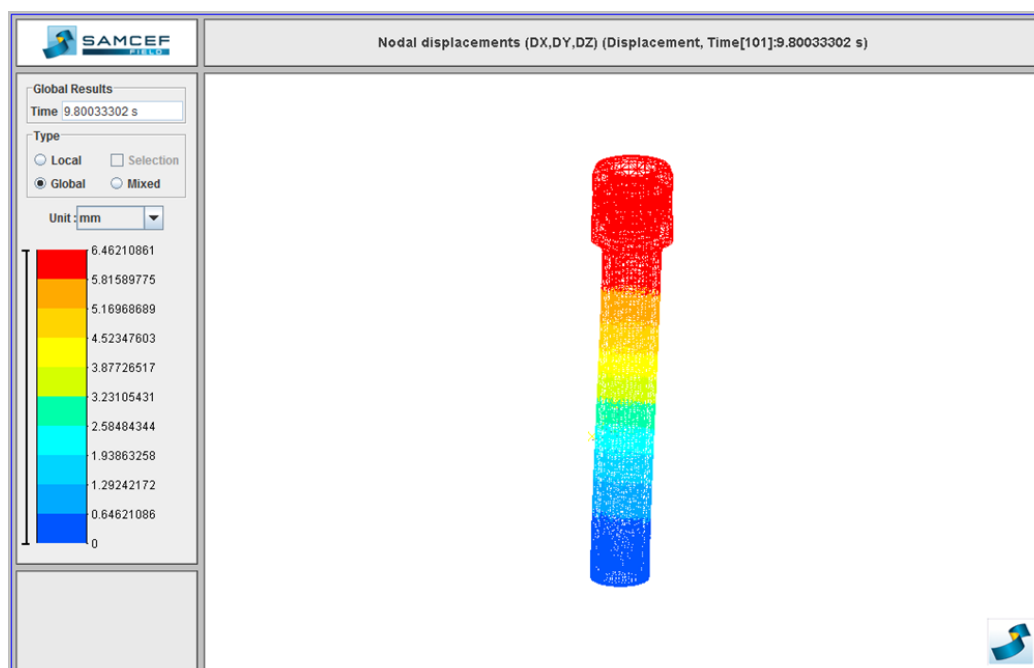


Figura 20 Desplazamientos nodales para un instante dado



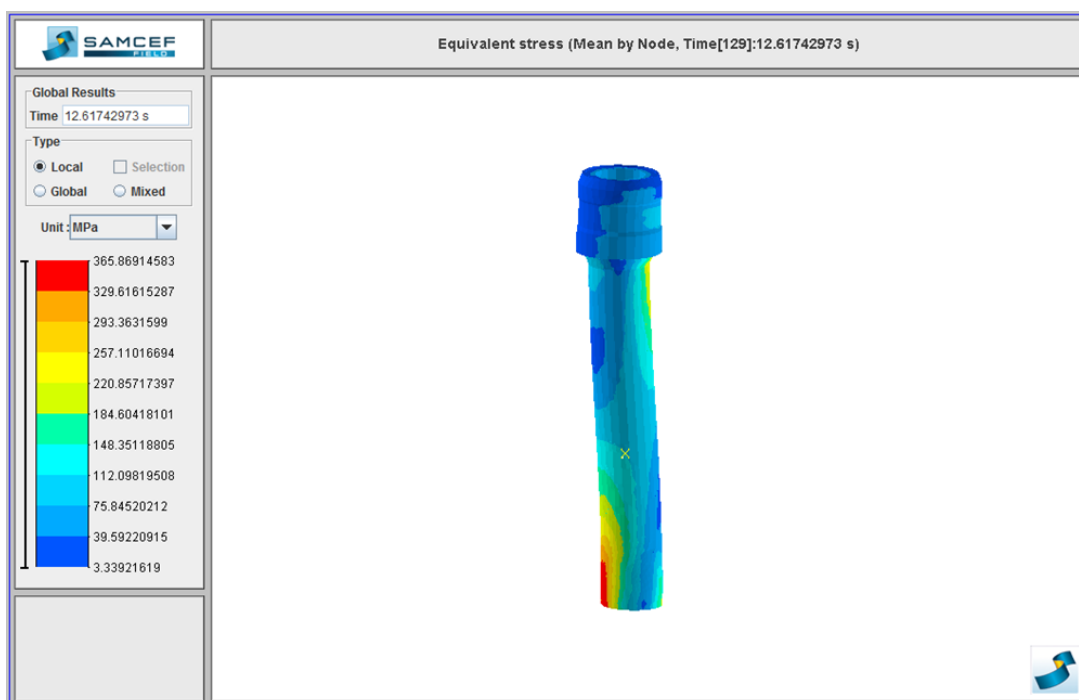


Figura 21 Tensiones Equivalentes para un instante dado

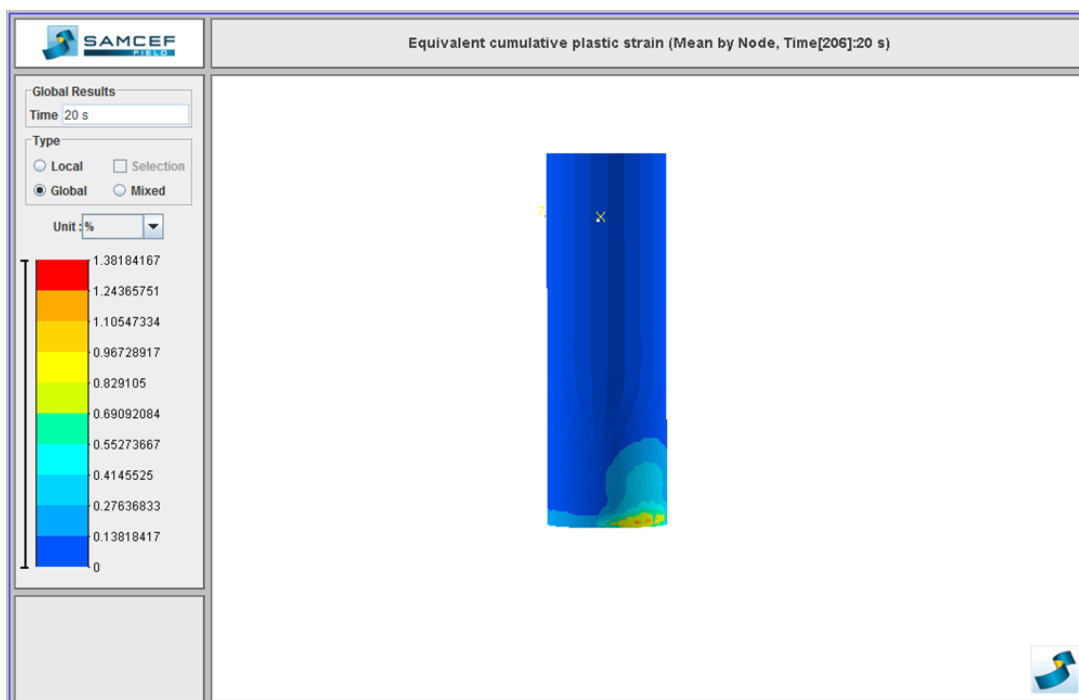


Figura 22 Deformaciones Plásticas Acumuladas

#### 4 CONCLUSIONES

Los resultados de tensiones indican que por efecto de un evento sísmico de las características del RLE propuesto para el sitio de la CNA II, se alcanzaría la tensión de fluencia del material del canal combustible. Sin embargo, se puede apreciar en la curva tensión-deformación que el material del canal combustible tiene una importante reserva de ductilidad para deformarse plásticamente sin llegar a la rotura. Por ello, se puede concluir que

las deformaciones plásticas acumuladas de 1,40%, no comprometen la integridad del canal combustible desde el punto de vista de la seguridad radiológica.

## REFERENCIAS

- Aravind K., “J-R Behaviour of 20MnMoNi55 Pressure Vessel Steel”, Department of Metallurgical and Materials Engineering, National Institute of Technology, Rourkela (India) .2009.
- James J. Johnson and Associates, “Peer Review of Aspects of the Seismic Safety Evaluation Programme of the Atucha II NPP, Argentina”. 2012.
- James J. Johnson and Associates, “Seismic Analyses of Atucha II NPP (CNA II) Reactor Building: Refueling Machine Input”.2013.
- Samcef Field V8.4-1 User Manual. Siemens PLM Software Inc., [http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/lms/samtech/samcef-solver-suite/nonlinear-motion-analysis.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/samtech/samcef-solver-suite/nonlinear-motion-analysis.shtml). 2013
- Wilson Edward L., “Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures”.Computers and Structures, Berkeley (USA), 1995.