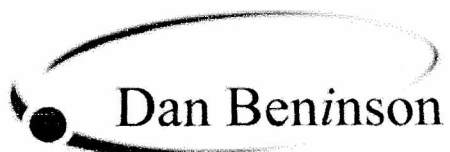


Informe de registro

id	9-Biblioteca-Bibliografia
Tipo	Tesina <input type="checkbox"/>
Titulo	Verificación del diseño mecánico estructural del elemento combustible para el reactor Maria de Polonia <input type="checkbox"/>
Autor	Guzman Carlos A. <input type="checkbox"/>
Ubicacion	IDB-CAC <input type="checkbox"/>
Editorial	IDB <input type="checkbox"/>
Ano	04-2008 <input type="checkbox"/>
ISBN	0 <input type="checkbox"/>
Observaciones	Director: Alvarez Luis Verificación del diseño de prototipo del combustible de bajo enriquecimiento para el reactor MARIA, desde el punto de vista mecánico estructural. Se concluye que para el análisis realizado bajo el alcance de este trabajo, el diseño del prototipo es un diseño seguro, no siendo esperable la aparición de fallas sistemáticas relacionadas con el diseño estructural durante el servicio nuclear de los elementos combustibles. ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES Y CICLO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR <input type="checkbox"/>



Dan Beninson

Instituto de Tecnología Nuclear

**“VERIFICACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO ESTRUCTURAL DEL ELEMENTO
COMBUSTIBLE PARA EL REACTOR MARIA DE POLONIA”**

**ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES Y SU CICLO DE
COMBUSTIBLE**

Nombre Alumno: Ing. Carlos A. Guzmán
Director de Trabajo Final: Ing. Luis Álvarez



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

**“VERIFICACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO ESTRUCTURAL DEL ELEMENTO
COMBUSTIBLE PARA EL REACTOR MARIA DE POLONIA.”**

Trabajo final presentado para optar al título de
“Especialista en Reactores Nucleares y su Ciclo de Combustible”

Nombre Alumno: Ing. Carlos A. Guzmán
Director de Trabajo Final: Ing. Luis Álvarez

Abril – 2008



**DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE
ELEMENTOS COMBUSTIBLES**

IT-IEC-N° 03/07
Rev.: 0

INFORME TECNICO

Página: 1 de 23

Proyecto: MR-5
PROTOTIPO

TÍTULO: VERIFICACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO
ESTRUCTURAL DEL ELEMENTO COMBUSTIBLE PARA
EL REACTOR MARIA DE POLONIA

RESUMEN

Se realiza la verificación del diseño del prototipo del combustible de bajo enriquecimiento par el reactor MARIA, desde el punto de vista mecánico estructural. El informe fue realizado como trabajo final de la carrera de especialización de Reactores Nucleares y su Ciclo de Combustible del Instituto Dan Beninson.

Se concluye que para el análisis realizado bajo el alcance de este trabajo, el diseño del prototipo es un diseño seguro, no siendo esperable la aparición de fallas sistemáticas relacionadas con el diseño estructural durante el servicio nuclear de los elementos combustibles.

Preparó

Revisó

Aprobó

C. Guzmán

S.I. Núñez P.

L. Alvarez

Palabras Claves: MARIA, EC, PLACA, ELEMENTO, COMBUSTIBLE, NÚCLEO, CONVERSIÓN, DISEÑO ESTRUCTURAL.

DISTRIBUCIÓN:

- Archivo IEC
- Antecedente EC MR5
- Instituto Dan Beninson
- C. Guzmán
- E. Porro (sc)
- H. Taboada (sc)

(sc) Sólo Carátula

NOTA: Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No esta permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.

CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES	INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia	Código: IT-IEC-Nº 03 / 07 Revisión: 0 Página: 2 de 23
---	--	---

INDICE

- 1 DESCRIPCIÓN
 - 1.1 Descripción del reactor MARIA
 - 1.2 Proyecto de conversión del núcleo del reactor
 - 1.3 Objetivos y alcance del trabajo
 - 1.4 Descripción del elemento combustible propuesto
- 2 DESARROLLO
 - 2.1 Análisis de solicitaciones
 - 2.2 Cálculo de tensiones
 - 2.3 Tensión crítica de pandeo
- 3 COMPARACIÓN CON LA TENSION ADMISIBLE
- 4 TABLA DE TENSIONES
- 5 CONCLUSIONES
- 6 REFERENCIAS
- 7 ANEXO

<p align="center">CNEA</p> <p align="center">DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p align="center">INFORME TÉCNICO</p> <p align="center">Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-Nº 03 / 07</p> <p>Revisión: 0</p> <p>Página: 3 de 23</p>
--	---	--

1 DESCRIPCIÓN

1.1 Descripción del reactor

El reactor MARIA es un reactor de investigación de diseño ruso, el cual se puso crítico en diciembre de 1974. Se encuentra en Swierk cerca de Varsovia. Inicialmente operaba con combustibles de uranio de alto enriquecimiento (HEU), 80% de ^{235}U . El operador de MARIA es el Instituto de Energía Atómica de Polonia. Es un reactor tipo piletta moderado por berilio y agua con reflector de grafito. Los elementos combustibles se hallan dentro de canales o tubos presurizados y estos a la vez se encuentran en el interior de bloques de berilio formando una matriz rodeada por el agua de la piletta. Está provisto de canales verticales para la producción de radioisótopos e irradiación de muestras.

Principales características del reactor MARIA

- Potencia nominal: 30 MW térmicos
- Densidad de flujo de neutrones térmicos: 4.0×10^{14} n/cm².s
- Moderador: H₂O y berilio
- Sistema de refrigeración: por medio de canales
- Elemento combustible actual:
 - Material combustible: UO₂ – Al
 - Enriquecimiento: 36 %
 - Material de la vaina: aluminio
 - Forma: seis tubos concéntricos
 - Longitud activa: 1000 mm
- Densidad de flujo térmico en los canales horizontales: 3 a 5×10^9 n/cm².s

Principales áreas de aplicación

- Producción de radioisótopos
- Ensayos de materiales combustibles y estructurales para futuros reactores
- Radiografía neutrónica
- Análisis de activación por neutrones
- Dopaje por transmutación neutrónica
- Investigación en física neutrónica

1.2 Proyecto de conversión del núcleo

Los datos de que dispone el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) indican que existen en el mundo 249 reactores de investigación en funcionamiento, de los que más de un centenar se siguen alimentando con uranio de alto enriquecimiento (HEU), material nuclear

<p style="text-align: center;">CNEA</p> <p style="text-align: center;">DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p style="text-align: center;">INFORME TÉCNICO</p> <p style="text-align: center;">Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-Nº 03 / 07</p> <p>Revisión: 0</p> <p>Página: 4 de 23</p>
--	---	--

considerado de alto riesgo porque se puede utilizar fácilmente para fabricar un explosivo nuclear.

Hace más de veinte años que el OIEA viene apoyando los esfuerzos internacionales encaminados a la reducción de la cantidad de HEU en el comercio internacional. Proyectos y actividades han sustentado directamente un programa que Estados Unidos puso en marcha en 1978, denominado Enriquecimiento Reducido para Reactores de Investigación y Ensayo (RERTR).

Las actividades del programa ordinario del Organismo se centran en la creación de las bases técnicas para reducir el HEU al mínimo, lo que supone, concretamente, apoyar la conversión del combustible de los reactores en uranio de bajo enriquecimiento (LEU) y la producción de radioisótopos a partir de éste.

Recientemente, el IAE ha estado estudiando la posibilidad de utilizar combustible de uranio (U_3Si_2) con una densidad de $4,8 \text{ g/cm}^3$ poco enriquecido (LEU) para convertir el reactor MARIA, ya que se cuenta con una amplia experiencia en la utilización de este combustible en numerosos reactores de investigación de diversas partes del mundo.

Como resultado de estas actividades se definió un acuerdo de cooperación técnica en el marco del cual se lanzó una licitación internacional para la conversión del reactor.

En dicha licitación se previeron 2 fases:

La fase 1 incluye el ámbito de investigación, y servicios de diseño de ingeniería para el desarrollo y la verificación del diseño mecánico de los combustibles y todo lo necesario planos y especificaciones mecánicas, incluida la inspección de la documentación técnica. Esta fase incluye la entrega de dos prototipos sin núcleo combustible para realizar ensayos hidráulicos y dos elementos combustibles precursores para ensayos de irradiación.

Fase 2 consiste en la compra de la cantidad de combustible de uranio poco enriquecido necesario para la conversión del reactor MARIA. Este paso está condicionado a la conclusión con éxito de las pruebas de irradiación como se mencionó anteriormente.

Argentina participó en dicha licitación, que finalmente le fue otorgada, y para ello el Departamento Ingeniería de Elementos Combustibles de la CNEA efectuó el diseño del EC alternativo a emplearse en la conversión.

1.3 Objetivos y alcances del trabajo

El objetivo del presente trabajo es la verificación del diseño del elemento combustible propuesto MR-5, desde un punto de vista mecánico estructural. El alcance del mismo es la determinación del estado de sollicitación en diferentes condiciones, las que se consideran más críticas: EC dentro del reactor y en operación normal, en la manipulación durante la carga y en el transporte. A partir de esas sollicitaciones se calcularán las tensiones que se comparan con una tensión admisible asumida.

1.4 Descripción del elemento combustible propuesto

El EC tiene una geometría cilíndrica ^[1] (Fig. 1), está compuesto por cinco capas concéntricas con un elemento estructural que las ensambla, cada una de estas capas contiene tres placas combustibles ^[2], guiadas axialmente por una pieza estructural ^[3] formada por tres aletas las

CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES	INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia	Código: IT-IEC-Nº 03 / 07 Revisión: 0 Página: 5 de 23
---	--	---

que se extienden desde un tubo central y lo dividen en sectores circulares de 120° (Fig. 2). Las placas combustibles centrales tipo 3, se encuentran fijadas axialmente al canal guía de la aleta de la pieza estructural por medio de un repujado. El resto de las placas combustibles tipo 1,2,4 y 5 van colocadas en las ranuras las que tienen un huelgo de 0.1 mm y se soportan en las ranuras de guía de la boquillas extremas.

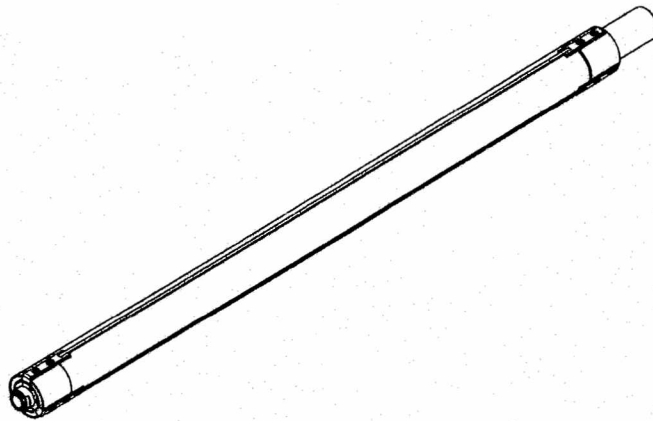


Figura 1: EC

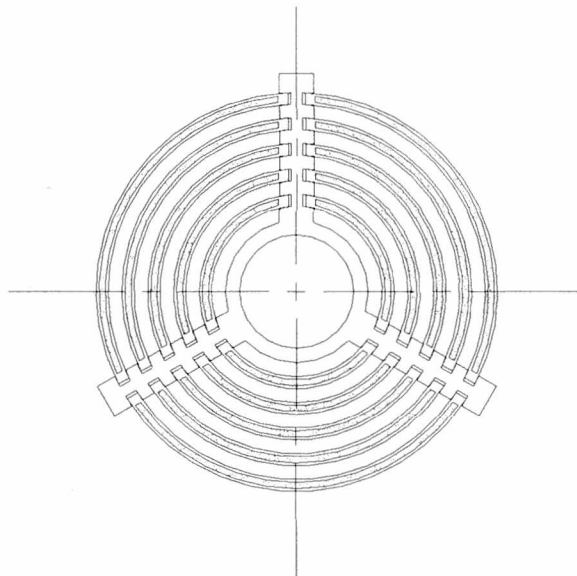


Figura 2: corte parte activa del EC

<p>CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p>INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-N° 03 / 07 Revisión: 0 Página: 6 de 23</p>
--	---	--

En los extremos de las placas combustibles hay cuatro boquillas ^[4], dos en la parte inferior y dos en la superior, que cumplen una triple función: completar la estructura resistente, asegurar la separación de las placas combustibles y canalizar el flujo del refrigerante (Fig. 3).

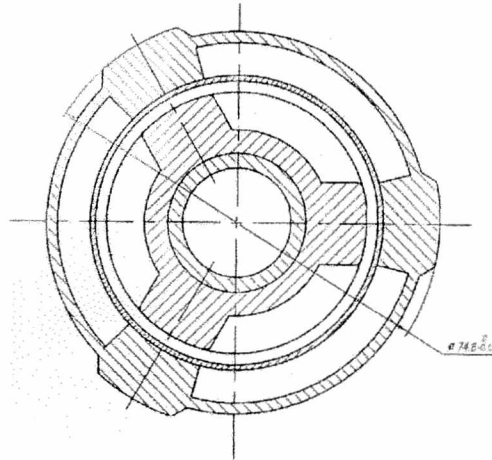


Figura 3: corte del EC en las boquillas

La pieza estructural se conforma a partir de un perfil extrudado de aluminio, que en ambos extremos posee tallada una rosca M 25 x 1. Las boquillas interiores, tanto la superior como la inferior, están tomadas a la pieza estructural por medio de las roscas antes mencionadas y sus respectivas tuercas ^[5] (Fig. 4). Las boquillas exteriores están tomadas a las interiores mediante tornillos ^[6] (Fig. 4, 5 y 6). En la parte superior sobresale un tubo ^[7] por el que sale el fluido refrigerante (Fig. 6). El EC cuelga en el reactor mediante un elemento que se une al tubo por medio de un proceso de rolado del tubo sobre dicho elemento.

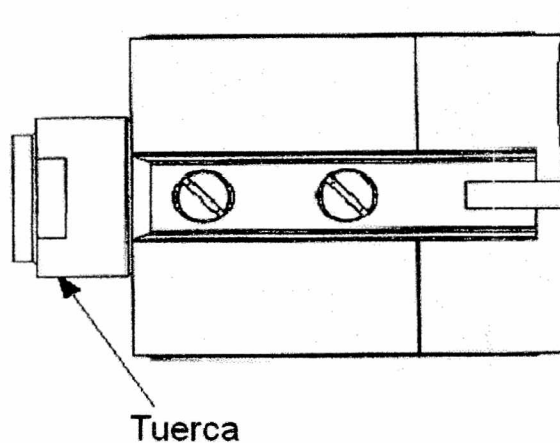


Figura 4: Extremo inferior del EC

<p>CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p>INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-N° 03 / 07 Revisión: 0 Página: 7 de 23</p>
--	---	--

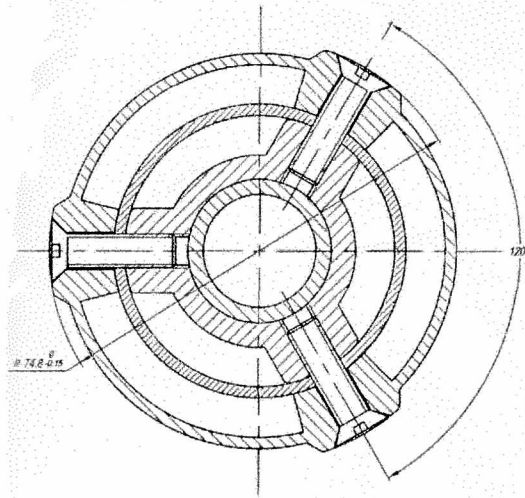


Figura 5 Sección de la unión atornillada de las boquillas del EC

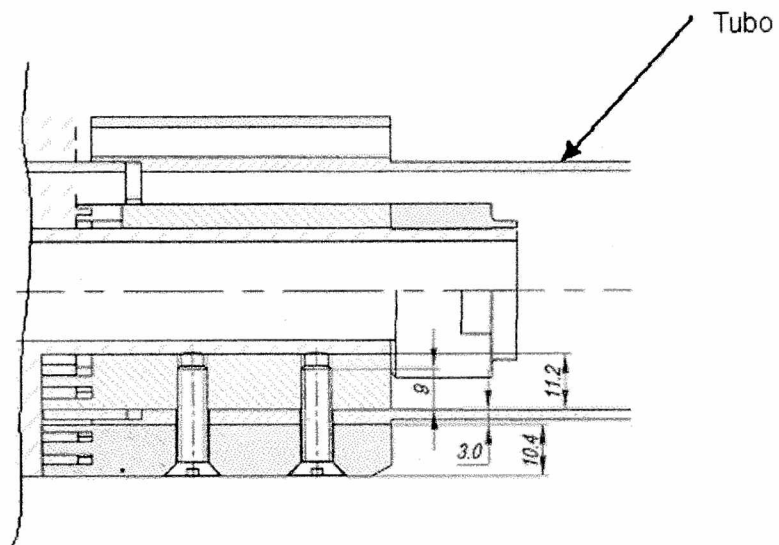


Figura 6: corte extremo superior

<p style="text-align: center;">CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p style="text-align: center;">INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-Nº 03 / 07 Revisión: 0 Página: 8 de 23</p>
--	--	--

2 DESARROLLO

2.1 Análisis de solicitaciones

Para este análisis se considera el EC propuesto, dentro del reactor en régimen estacionario y en operación normal, caudal de refrigerante nominal y sin transitorios de potencia, durante su manipulación mientras es colocado en el tubo de presión y durante su transporte, las dos últimas operaciones se realizan con el EC en forma horizontal.

2.1.1 Operación normal

El EC posee una simetría radial por lo tanto la resultante de las fuerzas normales a las placas combustibles, inducidas por la diferencia de presión que se produce por la diferencia de velocidad a un lado y otro de las placas puede considerarse nula y de esta manera se descarta la posibilidad de que el tubo del EC este sometido a flexión durante su operación dentro del reactor.

Solicitaciones:

En las piezas estructurales

- Peso propio
- Empuje por fricción del flujo refrigerante con las paredes de los canales conformados por las placas.

En las placas combustibles

- Carga sobre las placas combustibles por diferencia de presión.

En condiciones de operación normal en el reactor, el EC cuelga dentro del tubo de presión por medio del tubo superior del EC soportando el peso propio.

La fricción del fluido refrigerante contra las paredes de los canales de refrigeración del EC, las que son producidas por la tensión de corte en la capa límite, varía con el cuadrado de la velocidad media ^[12] del fluido refrigerante. La relación de áreas de los canales de refrigeración del EC se obtiene de sumar el triple de las áreas que corresponden a los canales formados por la placa central (tipo 3), las dos placas siguientes de mayor diámetro y el tubo de presión, por donde el refrigerante es de escurrimiento descendente, sobre el área que forma la placa central (tipo 3), las dos de menor radio y la pieza estructural donde el escurrimiento tiene sentido ascendente es de aproximadamente 2,2. El caudal de refrigeración tanto el descendente como el ascendente es el mismo, entonces la velocidad media del escurrido en el sentido ascendente resulta 2,2 veces mayor que la descendente. En función de esto se puede concluir que si bien el área de las paredes que forman los canales interiores del EC es menor que el área de los exteriores, la fuerza de fricción neta tiene sentido contrario al peso propio del EC y por lo tanto no se tendrá en cuenta con el objeto de hacer un análisis más conservativo.

Como resultado de lo expuesto anteriormente, se puede determinar que el tubo está sometido a una sollicitación axial de tracción cuyo valor es el peso del EC.

En la unión por medio de tornillos, la sollicitación es mediante fuerzas transversales, se verifica como una unión del tipo fricción y el caso más desfavorable se consideran los

<p style="text-align: center;">CNEA</p> <p style="text-align: center;">DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p style="text-align: center;">INFORME TÉCNICO</p> <p style="text-align: center;">Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-N° 03 / 07</p> <p>Revisión: 0</p> <p>Página: 8 de 23</p>
--	---	--

2 DESARROLLO

2.1 Análisis de solicitaciones

Para este análisis se considera el EC propuesto, dentro del reactor en régimen estacionario y en operación normal, caudal de refrigerante nominal y sin transitorios de potencia, durante su manipulación mientras es colocado en el tubo de presión y durante su transporte, las dos últimas operaciones se realizan con el EC en forma horizontal.

2.1.1 Operación normal

El EC posee una simetría radial por lo tanto la resultante de las fuerzas normales a las placas combustibles, inducidas por la diferencia de presión que se produce por la diferencia de velocidad a un lado y otro de las placas puede considerarse nula y de esta manera se descarta la posibilidad de que el tubo del EC este sometido a flexión durante su operación dentro del reactor.

Solicitaciones:

En las piezas estructurales

- Peso propio
- Empuje por fricción del flujo refrigerante con las paredes de los canales conformados por las placas.

En las placas combustibles

- Carga sobre las placas combustibles por diferencia de presión.

En condiciones de operación normal en el reactor, el EC cuelga dentro del tubo de presión por medio del tubo superior del EC soportando el peso propio.

La fricción del fluido refrigerante contra las paredes de los canales de refrigeración del EC, las que son producidas por la tensión de corte en la capa límite, varía con el cuadrado de la velocidad media ^[12] del fluido refrigerante. La relación de áreas de los canales de refrigeración del EC se obtiene de sumar el triple de las áreas que corresponden a los canales formados por la placa central (tipo 3), las dos placas siguientes de mayor diámetro y el tubo de presión, por donde el refrigerante es de escurrimiento descendente, sobre el área que forma la placa central (tipo 3), las dos de menor radio y la pieza estructural donde el escurrimiento tiene sentido ascendente es de aproximadamente 2,2. El caudal de refrigeración tanto el descendente como el ascendente es el mismo, entonces la velocidad media del escurrido en el sentido ascendente resulta 2,2 veces mayor que la descendente. En función de esto se puede concluir que si bien el área de las paredes que forman los canales interiores del EC es menor que el área de los exteriores, la fuerza de fricción neta tiene sentido contrario al peso propio del EC y por lo tanto no se tendrá en cuenta con el objeto de hacer un análisis más conservativo.

Como resultado de lo expuesto anteriormente, se puede determinar que el tubo está sometido a una sollicitación axial de tracción cuyo valor es el peso del EC.

En la unión por medio de tornillos, la sollicitación es mediante fuerzas transversales, se verifica como una unión del tipo fricción y el caso más desfavorable se consideran los

<p align="center">CNEA</p> <p align="center">DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p align="center">INFORME TÉCNICO</p> <p align="center">Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-N° 03 / 07</p> <p>Revisión: 0</p> <p>Página: 9 de 23</p>
---	---	--

tornillos sin el torque de ajuste suficiente, de manera que la unión trabaje a corte verificándola por aplastamiento.

Para verificar esta unión por fricción se considera que en cada tornillo debe soportar 1/6 del peso del elemento combustible por un coeficiente de seguridad, que incluye posibles sobre cargas, incertidumbres etc.

$$F_f = \mu_e \cdot \frac{1}{6} P_{EC} \cdot C$$

$$\mu_e = 1.05^{[8]}$$

C: coeficiente de seguridad.

Siendo ésta la fuerza de precarga necesaria para el ajuste del tronillo. Por lo que el momento o torque de ajuste se calcula mediante la siguiente expresión^[8]:

$$T = \frac{F_f \cdot d_m}{2} \left(\frac{\operatorname{tg} \lambda + \mu_d \cdot \operatorname{seca} \alpha_R}{1 - \mu_d \cdot \operatorname{tg} \lambda \cdot \operatorname{seca} \alpha_R} \right) + \frac{F_f \cdot \mu_d \cdot d_c}{2}$$

$$T = 0,397 \text{ N}\cdot\text{m}$$

T: momento de ajuste

d_m : diámetro medio

$$d_m = d - 0,649 \cdot p$$

d = 6 mm diámetro del tornillo

p = 1 mm paso de la rosca

α_R : 30° medio ángulo de rosca

$\mu_d = 1.4$ coeficiente de rozamiento dinámico aluminio - aluminio^[10]

d_c : 9 mm diámetro de contacto

$$\operatorname{tg} \lambda = l / \pi \cdot d_m$$

$$l = n \cdot p$$

n = 1 número de entradas

CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES	INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia	Código: IT-IEC-N° 03 / 07 Revisión: 0 Página: 10 de 23
---	--	--

En la unión roscada de las piezas interiores con la pieza estructural no existen solicitaciones transversales que pudieran ser significativas, por lo que se considera la rosca solicitada a tracción debido a peso propio más la precarga que se estima en diez veces el peso propio.

$$F_t = P_t + F_{it}$$

$$F_t = 1110 \text{ N}$$

$$P_t = \frac{k_t \cdot P_{EC}}{k_t + k_{pi}}$$

$$k_t = A_r \cdot \frac{E_{Al}}{l_t}$$

$$A_r = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - d_i^2)$$

$$k_{pi} = \frac{\pi \cdot E_{Al} \cdot \tan \alpha}{\ln \left[\frac{(2t \cdot \tan \alpha + D - d) \cdot (D + d)}{((2t \cdot \tan \alpha + D + d)) \cdot (D - d)} \right]}$$

$$F_{it} = C_t \cdot P_{EC}$$

F_t : carga total sobre el extremo roscado.

P_t : parte de la carga externa que toma el extremo roscado.

F_{it} : precarga.

$C_t = 10$ factor de amplificación de carga.

$k_t = 1,786 \cdot 10^8$ N/m rigidez del extremo roscado de la unión.

A_r : área resistente del extremo roscado de la unión.

$D_e = 25$ mm diámetro externo del extremo roscado.

$d_i = 20$ mm diámetro interno del extremo roscado.

$l_t = 65$ mm longitud activa del extremo roscado en la unión.

$k_{pi} = 1,973 \cdot 10^9$ N/m rigidez de la sección resistente de la boquilla superior interna.

$\alpha = 30^\circ$ ángulo del tronco cono resistente.

$t = 65$ mm espesor de la boquilla

<p style="text-align: center;">CNEA</p> <p style="text-align: center;">DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p style="text-align: center;">INFORME TÉCNICO</p> <p style="text-align: center;">Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-N° 03 / 07</p> <p>Revisión: 0</p> <p>Página: 11 de 23</p>
--	---	---

$D = 33$ mm diámetro del collarín de la tuerca.

$d = 25$ mm diámetro del agujero de la boquilla.

El momento de ajuste necesario de las tuercas para las condiciones antes mencionadas es el siguiente:

$$T = \frac{F_{it} \cdot d_{mp}}{2} \left(\frac{\operatorname{tg} \lambda + \mu_d \cdot \operatorname{seca} \alpha_R}{1 - \mu_d \cdot \operatorname{tg} \lambda \cdot \operatorname{seca} \alpha_R} \right) + \frac{F_f \cdot \mu_d \cdot D}{2}$$

$$T_t = 54.869 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$d_{mp} = d - 0,649 \cdot p$$

$p = 1$ mm paso del extremo roscado.

$$\operatorname{tg} \lambda = l / \pi \cdot d_{mp}$$

$\alpha_R = 30^\circ \frac{1}{2}$ del ángulo de rosca

2.1.2 Manipulación del EC

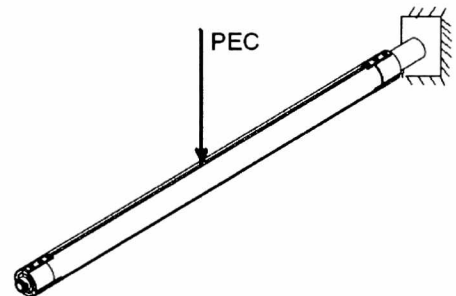
Durante la manipulación se considera como la situación más desfavorable al EC tomado del tubo en forma horizontal de manera que el modelo es el de una viga en voladizo (empotrado – libre) y la sollicitación por flexión es debida al momento que ejerce su peso propio.

$$M = P_{EC} \frac{l_{EC}}{2}$$

$$M = 64.77 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$P_{EC} = 110,10$ N peso del elemento combustible

$l_{EC} = 1275$ mm largo del voladizo del EC



2.1.3 Transporte

Para el caso del transporte el EC se encuentra en forma horizontal, de esta forma se halla cargado por su peso y se considera simplemente apoyado sobre dos de las aletas de la pieza estructural (Fig. 7). De esta forma dichas aletas se encuentran sollicitadas a flexión en la zona de unión con la placa combustible central ya que se une a la pieza estructural por medio de un repujado del canal guía sujetando a la placa combustible tipo 3.

CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES	INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia	Código: IT-IEC-N° 03 / 07 Revisión: 0 Página: 12 de 23
---	--	--

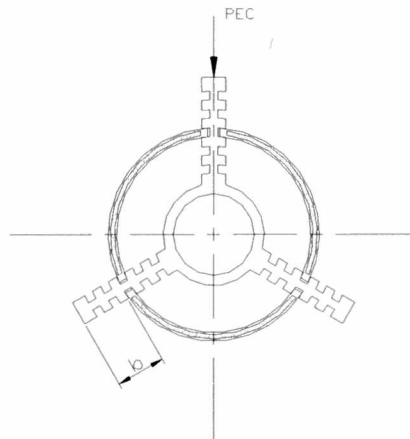


Figura 7

Para hacer más conservativo el cálculo, se desprecia la reacción que las placas centrales le ofrecen por fricción a la aleta en su parte media y se calcula como si la longitud del brazo de palanca del momento flexor fuera "b" como se indica en la figura 8.

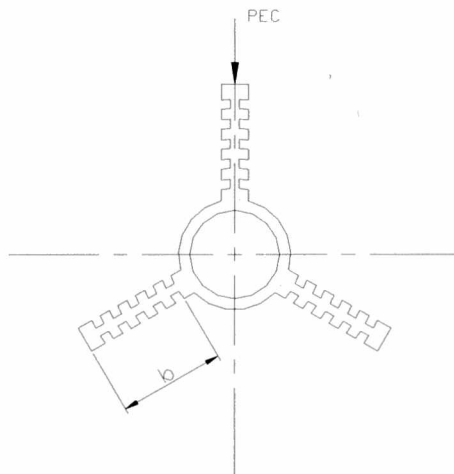


Figura 8

<p style="text-align: center;">CNEA</p> <p style="text-align: center;">DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p style="text-align: center;">INFORME TÉCNICO</p> <p style="text-align: center;">Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-N° 03 / 07</p> <p>Revisión: 0</p> <p>Página: 13 de 23</p>
---	---	---

$$M_a = \frac{P_{EC} \cdot \cos\beta}{2} \cdot b$$

$$M_a = 1,046 \text{ N.m}$$

M_a : momento en la aleta

$$\beta = 30^\circ \text{ (Fig. 9)}$$

$b = 22.4$ ancho resistente de la aleta

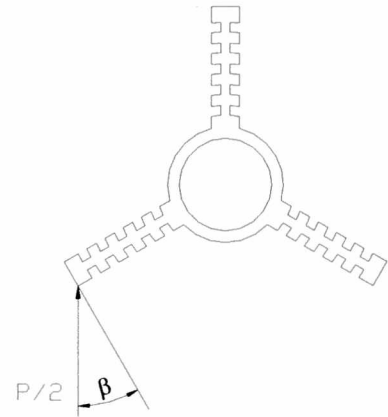


Figura 9

2.2 Cálculo de tensiones

Se calculan las tensiones producidas por los estados de sollicitación considerados, en las secciones más comprometidas.

2.2.1 Tensiones en operación normal

El tubo posee un diámetro interno igual en toda su longitud y dos sectores de diferente diámetro externo, en el sector de mayor diámetro externo tiene tres perforaciones por donde pasan tornillos, se calculó la tensión en la menor sección de las dos que corresponde a la de menor diámetro externo.

$$S_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - d_1^2)$$

$$S_1 = 314,159 \text{ mm}^2$$

$D_1 = 52$ mm diámetro externo menor.

$d_1 = 48$ mm diámetro interno.

$$S_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_2^2 - d_1^2) - d \cdot (D_2 - d_1) \cdot n$$

$$S_2 = 372,7 \text{ mm}^2$$

$D_2 = 54$ mm diámetro externo mayor.

$d = 6$ mm diámetro de los agujeros transversales del tubo.

$n = 3$ número de agujeros transversales.

$$\sigma_1 = \frac{P_{EC}}{S_1}$$

<p align="center">CNEA</p> <p align="center">DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p align="center">INFORME TÉCNICO</p> <p align="center">Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-N° 03 / 07</p> <p>Revisión: 0</p> <p>Página: 14 de 23</p>
---	---	---

$\sigma_1 = 0,35$ MPa tensión en la menor sección del tubo

En el extremo de la pieza estructural (extremo de la unión roscada) la tensión en la sección anular es debida al peso propio más la precarga de la unión roscada.

$$\sigma_R = \frac{F_t}{A_r}$$

$$A_r = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - d_i^2)$$

$\sigma_R = 6,282$ MPa

$F_t = 1110$ N carga total sobre el extremo roscado.

$A_r = 176.71$ mm² área resistente del extremo roscado de la unión.

$D_e = 25$ mm diámetro externo del extremo roscado.

$d_i = 20$ mm diámetro interno del extremo roscado.

En la unión atornillada compuesta por la boquilla interior, placa combustible tipo 3, tubo y boquilla exterior, se calculan las tensiones en los tornillos M6 solicitados a tracción producto del momento necesario, para el ajuste de la unión sea del tipo fricción.

$$\sigma_{\text{tor}} = \frac{F_t}{A_t}$$

$\sigma_{\text{tor}} = 1,753$ MPa

F_t : fuerza sobre el tornillo

$A_t = 20,1$ mm² área de tensión del tornillo.

Para el caso de aplastamiento se calcula la tensión de corte en los tornillos y la de tracción en la menor sección de área proyectada.

Corte en el tornillo:

$$\tau = \frac{P_{EC}}{A_c \cdot n} \cdot C$$

$\tau = 1,038$ MPa tensión de corte en el tornillo.

$C = 1.6$ coeficiente de seguridad.

$A_c = 20,1$ mm² área de corte.

CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES	INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia	Código: IT-IEC-Nº 03 / 07 Revisión: 0 Página: 15 de 23
---	--	--

$n = 6$ número de tornillos presentes en la unión.

$$\sigma_{\text{apl}} = \frac{P_{\text{EC}}}{A_{\text{apl}} \cdot n} \cdot C$$

$$\sigma_{\text{apl}} = 1,019 \text{ MPa}$$

$$A_{\text{apl}} = t_c \cdot d$$

$A_{\text{apl}} = 18 \text{ mm}^2$ área proyectada.

$t_c = 3 \text{ mm}$ espesor de la pared del tubo.

$d = 6 \text{ mm}$ diámetro del agujero.

2.2.2 Tensiones producidas por la manipulación del EC

Se calcula la tensión en la sección más comprometida del tubo que corresponde a la menor de las dos secciones halladas en el punto 2.2.1.

$$\sigma_{\text{ft}} = \frac{M}{I_x} \cdot \frac{D_1}{2}$$

$\sigma_{\text{ft}} = 18.559 \text{ MPa}$ tensión por flexión en el tubo.

$$I_x = \frac{\pi}{64} \cdot (D_1^4 - d_1^4)$$

$M = 70,192 \text{ N}\cdot\text{m}$ momento debido al peso del EC.

$I_x = 9,833 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ momento de inercia de la sección del tubo.

$D_1 = 52 \text{ mm}$ diámetro exterior del tubo (menor sección).

$d_1 = 48 \text{ mm}$ diámetro interno del tubo.

En el perno de la pieza estructural en la sección contigua al comienzo de las aletas, se suma la sollicitación por el ajuste de la tuerca traccionando al perno más la sollicitación por flexión, ya que las fuerzas se transmiten al tubo a través de la boquilla superior interna por medio de la unión atornillada con la boquilla superior externa.

$$\sigma_{\text{per}} = \sigma_f + \sigma_r$$

$\sigma_{\text{per}} = 83,74 \text{ MPa}$ tensión por flexión en el perfil más tracción en unión roscada.

$$\sigma_f = \frac{M}{I_x} \cdot \frac{D_e}{2} \text{ tensión por flexión en el perno del perfil resistente.}$$

CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES	INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia	Código: IT-IEC-N° 03 / 07 Revisión: 0 Página: 16 de 23
---	--	--

$$I_x = \frac{\pi}{64} \cdot (D_e^4 - d_i^4)$$

$$\sigma_r = \frac{F_t}{A_r} \text{ tensión por tracción en unión roscada.}$$

$I_x = 1,132 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ momento de inercia del perno del perfil resistente.

$F_t = 1010 \text{ N}$ precarga carga sobre el extremo roscado.

$A_r = 176.71 \text{ mm}^2$ área resistente del extremo roscado de la unión.

$D_e = 25 \text{ mm}$ diámetro externo del extremo roscado.

$d_i = 20 \text{ mm}$ diámetro interno del extremo roscado.

2.2.3 Tensiones en el transporte

Se analiza la sección de la aleta del marco sometida a flexión por peso propio.

$$\sigma_{\text{ala}} = \frac{M_a}{I_{\text{res}}} \cdot \frac{h_{\text{res}}}{2}$$

$$\sigma_{\text{ala}} = 1.462 \text{ MPa}$$

$$I_{\text{res}} = \frac{l_{\text{ala}} \cdot h_{\text{res}}^3}{12}$$

$M_a = 1,046 \text{ N.m}$ momento en el ala.

$h_{\text{res}} = 2 \text{ mm}$ altura de la sección resistente.

$I_{\text{res}} = 733,333 \text{ mm}^4$ momento de inercia de la sección resistente.

$l_{\text{ala}} = 1100 \text{ mm}$ largo del aleta del perfil estructural.

2.3 Determinación de la tensión crítica de pandeo

Considerando la placa combustible central como una cáscara cilíndrica sometida a compresión uniforme producida por una presión externa, la expresión que da la tensión crítica de pandeo^[11] es la siguiente:

<p align="center">CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p align="center">INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-Nº 03 / 07 Revisión: 0 Página: 17 de 23</p>
---	---	---

Para el caso de extremos articulados:

$$\sigma_{cr} = \frac{E_{com} \cdot I}{L_{p3}^3 \cdot R_{p3}^3} \cdot \left(\frac{\pi^2}{\alpha_m^2} - 1 \right)$$

$$\sigma_{cr} = 22,437 \text{ MPa}$$

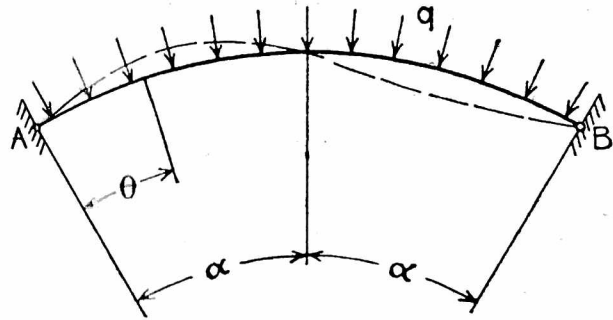
σ_{cr} : Tensión crítica de pandeo

E_{com} : módulo de elasticidad de la placa 3

I : momento de inercia de la placa tipo 3

$L_{p3} = 1207 \text{ mm}$ longitud de la placa tipo 3

$R_{p3} = 25 \text{ mm}$ radio medio de la placa tipo 3



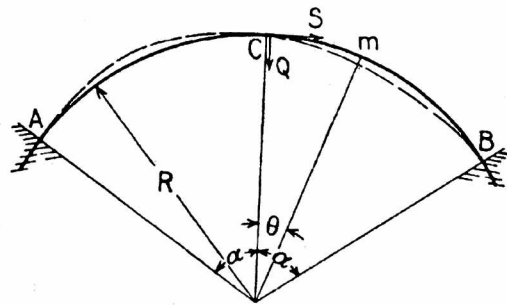
El módulo de elasticidad se toma el del aluminio y no el del compuesto aluminio de la placa más el módulo del compuesto núcleo, resultando el cálculo más conservativo.

Para el caso de extremos empotrados:

$$\sigma_{cr} = \frac{E_{com} \cdot I}{L_{p3}^3 \cdot R_{p3}^3} \cdot (k^2 - 1)$$

$$\sigma_{cr} = 50,855 \text{ MPa}$$

$k = 4,375$ coeficiente que depende del ángulo α



α	30°	60°	90°	120°	150°	180°
k	8.621	4.375	3	2.364	2.066	2

<p style="text-align: center;">CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p style="text-align: center;">INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-N° 03 / 07 Revisión: 0 Página: 18 de 23</p>
--	--	---

3 COMPARACIÓN CON LA TENSIÓN ADMISIBLE

Como tensión admisible de diseño se adopta el siguiente valor ^[13]:

$$\sigma_{adm} = 2/3 P_{02}$$

$$P_{02} = 214 \text{ MPa límite convencional de fluencia }^{[9]}.$$

$$\sigma_{adm} = 142 \text{ MPa}$$

En operación normal la máxima tensión se produce en el extremo de la pieza estructural (perno de la unión roscada) en la sección anular.

$$\sigma_R = 6,282 \text{ MPa}$$

$$f_{so} = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_R} \text{ factor de seguridad en operación.}$$

$$f_{so} = 22,6$$

En la manipulación del EC la máxima tensión se produce en el perno de la pieza estructural en la sección contigua al comienzo de las aletas.

$$\sigma_{per} = 83,74 \text{ MPa}$$

$$f_{sm} = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{per}} \text{ factor de seguridad durante la manipulación.}$$

$$f_{sm} = 1,7$$

Dado que la caída de presión entre la entrada y la salida del EC es de 0,6 MPa, asumiendo que esta sería la máxima diferencia de presión que se produce a un lado y otro de la placa combustible tipo 3, se tiene que respecto a la mínima tensión crítica de pandeo el factor de seguridad es el siguiente:

$$\sigma_{cr} = 12,863 \text{ MPa}$$

CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES	INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia	Código: IT-IEC-Nº 03 / 07 Revisión: 0 Página: 19 de 23
---	--	--

$f_{scr} = \frac{\sigma_{cr}}{\Delta_p}$ factor de seguridad respecto a la tensión crítica de pandeo.

$$f_{sm} = 21,08$$

4 TABLA DE TENSIONES

Tensión según sollicitación	Tensión en MPa	Tensión de comparación en MPa	Factor de seguridad
Tracción en tubo σ_1	0,35	142	405
Tracción extremo Roscado σ_R	6,282	142	22
Tracción en tornillo σ_{Tor}	1,753	142	81
Unión tipo aplastamiento σ_{apl}	1,019	142	139
Flexión en tubo σ_{ft}	18,559	142	7.6
Flexión + tracción extremo perfil σ_{per}	83,74	142	1.7
Flexión en aleta σ_{ala}	1,462	142	97
Pandeo en la placa combustible	0,6	22,5	37.5

5 CONCLUSIONES

De los cálculos precedentes se desprende que la máxima tensión se produce durante la manipulación del EC y toma un valor de 83,74 MPa. Si se compara con la tensión admisible se obtiene un factor de seguridad de 1,7.

En cuanto a la máxima tensión en operación normal del EC es de 6,282 MPa esta arroja un factor de seguridad de 22,6.

Sobre la base de estos factores de seguridad se puede concluir que para los estados de sollicitación durante la manipulación como en operación normal, el diseño del EC es un diseño seguro. Por lo tanto no es esperable la aparición de defectos sistemáticos durante el servicio nuclear de los elementos combustibles fabricados con este diseño.

<p align="center">CNEA</p> <p align="center">DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p align="center">INFORME TÉCNICO</p> <p align="center">Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-Nº 03 / 07</p> <p>Revisión: 0</p> <p>Página: 20 de 23</p>
--	---	---

6 REFERENCIAS

- [1] Plano CNEA 1.0.24.001 Rev. 0 VP1 : Ensamble general.
- [2] Plano CNEA 1.0.24.007 Rev. 0 VP1: Placas combustibles tipo1-2-3-4 y 5.
- [3] Plano CNEA 2.0.24E.013 Rev. 0 VP1: Pieza estructural.
- [4] Planos CNEA 3.0.24.008 Rev. 0 VP1: Boquilla superior externa, 3.0.24.009 Rev. 0 VP1: Boquilla superior interna, 3.0.24.010 Rev. 0 VP1: Boquilla inferior externa, 3.0.24.010 Rev. 0 VP1: Boquilla inferior interna.
- [5] Plano CNEA 4.0224.014 Rev. 0 VP1: Tuerca.
- [6] Plano CNEA 4.0.24.015 Rev. 0 VP1: Tornillos.
- [7] Plano CNEA 4.0.24.017 Rev. 0 VP1: Tubo.
- [8] Diseño en Ingeniería Mecánica. Joseph Edward Shingley, Charles R. Mischke. Ed. Mc. Graw Hill.
- [9] Metals Handbook Vol. 2 1990
- [10] Fastener desing manual. Richard T. Barret, Lewis Research Center Cleveland Ohio. NASA Reference Publication 1228-1990.
- [11] Theory of Elastic Stability Stephen P. Timoshenko Ed. Mc. Graw Hill
- [12] Mecánica de los fluidos. Frank M. White Ed. Mc Graw Hil.
- [13] ASME sección II 1998 tabla 1-100 Criterios para establecer los valores de tensión admisible.

CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES	INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia	Código: IT-IEC-Nº 03 / 07 Revisión: 0 Página: 21 de 23
---	--	--

7 ANEXO

1- Cálculo del peso del EC

El peso del EC se calcula a partir de los volúmenes y la densidad de las piezas que lo componen.

$$\rho_{Al} := 2.7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mm}^3} \quad \text{Densidad del aluminio}$$

$$\rho_{U_{\text{meat}}} := 6.54 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} \quad \text{Densidad del núcleo}$$

$$\rho_U := 19.07 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} \quad \text{Densidad del Uranio}$$

$$\rho_{Si} := 2.33 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} \quad \text{Densidad del silicio}$$

Cálculo de los volúmenes

Se calcularán solamente los volúmenes de las placas, volumen en aluminio y volumen del núcleo o meat, el resto se extraen de las propiedades de masa del programa CAD de dibujo.

$$V_{\text{meat1}} := 58.2 \cdot 0.90 \cdot 1000 \cdot \text{mm}^3$$

$$V_{Alp1} := 68.2 \cdot 2 \cdot 1100 \cdot \text{mm}^3 - V_{\text{meat1}}$$

$$V_{\text{meat2}} := 48.8 \cdot 0.88 \cdot 1000 \cdot \text{mm}^3$$

$$V_{Alp2} := 58.8 \cdot 2 \cdot 1100 \cdot \text{mm}^3 - V_{\text{meat2}}$$

$$V_{\text{meat3}} := 39.4 \cdot 0.87 \cdot 1000 \cdot \text{mm}^3$$

$$V_{Alp3} := 68.2 \cdot 2 \cdot 1207 \cdot \text{mm}^3 - V_{\text{meat3}}$$

$$V_{\text{meat4}} := 29.9 \cdot 0.83 \cdot 1000 \cdot \text{mm}^3$$

$$V_{Alp4} := 68.2 \cdot 2 \cdot 1100 \cdot \text{mm}^3 - V_{\text{meat4}}$$

CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES	INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia	Código: IT-IEC-N° 03 / 07 Revisión: 0 Página: 22 de 23
---	--	--

$$V_{Alp5} := 68.2 \cdot 2 \cdot 1100 \cdot \text{mm}^3 - V_{meat5}$$

$$V_{meat} := (V_{meat1} + V_{meat2} + V_{meat3} + V_{meat4} + V_{meat5}) \cdot 3$$

$$V_{meat} = 5.125 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$V_{Al} := (V_{Alp1} + V_{Alp2} + V_{Alp3} + V_{Alp4} + V_{Alp5}) \cdot 3$$

$$V_{Al} = 1.72 \times 10^6 \text{ mm}^3 \quad \text{Volumen total del aluminio en las placas combustibles}$$

Cálculo de la fracción en volumen en el núcleo

$$M_{AU} := 238 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \quad \text{Masa atómica del uranio}$$

$$M_{ASi} := 28.086 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \quad \text{Masa atómica del silicio}$$

$$M_U := V_{meat} \cdot \rho_{Umeat} \quad \text{Masa de uranio en el núcleo}$$

$$M_U = 3.351 \text{ kg}$$

$$M_{Si} := M_U \cdot 2 \cdot \frac{M_{ASi}}{3 \cdot M_{AU}} \quad \text{Masa de silicio en el núcleo}$$

$$F_U := \frac{\frac{M_U}{\rho_U}}{V_{meat}} \quad \text{Fracción en volumen de uranio}$$

$$F_U = 0.343$$

$$F_{Si} := \frac{\frac{M_{Si}}{\rho_{Si}}}{V_{meat}} \quad \text{Fracción en volumen de silicio}$$

$$F_{Si} = 0.221$$

$$F_{Al} := 1 - (F_U + F_{Si}) \quad \text{Fracción en volumen de aluminio}$$

$$F_{Al} = 0.436$$

<p>CNEA DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES</p>	<p>INFORME TÉCNICO Verificación del diseño mecánico estructural del Elemento Combustible para el reactor MARIA de Polonia</p>	<p>Código: IT-IEC-Nº 03 / 07 Revisión: 0 Página: 23 de 23</p>
--	---	---

Cálculo del peso del núcleo

El peso del núcleo se obtiene de multiplicar el volumen total del núcleo por la suma de las fracciones en volumen de cada componente por su densidad y la aceleración de la gravedad.

$$P_{meat} := V_{meat} \cdot (F_U \cdot \rho_U + F_{Si} \cdot \rho_{Si} + F_{Al} \cdot \rho_{Al}) \cdot g$$

$P_{meat} = 41.372N$ peso del núcleo

$P(v) := v \cdot mm^3 \cdot \rho_{Al} \cdot g$ Cálculo del peso del aluminio del EC

Volumen de cada pieza de aluminio del EC

v :=

	0
0	51926
1	55716
2	38756
3	6.17
4	1.72
5	11074
6	645
7	58262
8	42953

- 0 Tubo
- 1 Boquilla superior externa
- 2 Boquilla inferior interna
- 3 Pieza estructural
- 4 Aluminio en las placas
- 5 Tuercas
- 6 Tornillos
- 7 Boquilla inferior externa
- 8 Boquilla inferior intera

$P(v)^T = (1.375 \ 1.475 \ 1.026 \ 16.324 \ 45.542 \ 0.293 \ 0.017 \ 1.543 \ 1.137) N$

$P_{Al} := \sum P(v)$

$P_{Al} = 68.733N$ Peso del aluminio

El peso del EC se obtiene como la suma del peso total de aluminio mas el peso del núcleo

$P_{EC} := P_{Al} + P_{meat}$

$P_{EC} = 110.104N$ Peso total del elemento combustible

$P_{EC} = 11.228kgf$