

ANÁLISE TÉRMICA, TERMO-HIDRÁULICA E TERMO-MECÂNICA DO

COMBUSTÍVEL DO REATOR IEA-R1 A 5MW

Antonio Teixeira e Silva
Leandro Vieira da Silva Macedo

Divisão de Engenharia do Núcleo
Departamento de Tecnologia de Reatores
IPEN-CNEN/SP

RESUMO

Em conexão com a conversão em andamento do núcleo do reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP de combustíveis com alto enriquecimento em urânio (highly enriched uranium(HEU) fuel) para combustíveis com baixo enriquecimento em urânio (low enriched uranium(LEU) fuel), cálculos térmicos e termo-hidráulicos foram desenvolvidos em regime permanente para o núcleo atual predominantemente HEU deste reator e para um núcleo LEU proposto na potência de 2 MW. Eventualmente uma possível elevação da potência deste reator de 2 MW para 5 MW, cálculos térmicos, termo-hidráulicos e termo-mecânicos foram também desenvolvidos para o núcleo LEU proposto a 5 MW.

Os cálculos térmicos e termo-hidráulicos a 2 MW mostram que a conversão do núcleo HEU atual para o núcleo LEU proposto não alterará as margens de segurança do reator. A elevação da potência do reator de 2 MW para 5 MW reduzirá estas margens, mas elas serão ainda suficientes para operação ótima e desempenho seguro. Os cálculos termo-mecânicos a 5 MW mostram que as tensões térmicas no elemento combustível atenderão aos requisitos de resistência mecânica e estabilidade elástica propostos em projeto.

ABSTRACT

In connection with the on going conversion of IEA-R1 Research Reactor, operated by IPEN-CNEN/SP, from the use of highly enriched uranium (HEU) fuel to the use of low enriched uranium (LEU) fuel, steady-state thermal and thermo-hydraulic analysis of both existing HEU and proposed LEU cores under 2 MW operating conditions have been carried out. Keeping in mind the possibility of power upgrading, steady-state thermal, thermo-hydraulic and thermo-mechanical analysis of proposed LEU core under 5 MW operating conditions have also been carried out.

The thermal and thermo-hydraulic analysis at 2 MW show that the conversion of the existing HEU core to the proposed LEU core will not change the reactor safety margins. Although the upgrading of the reactor power to 5 MW will result in safety margins lower than in case of 2 MW, these will be still sufficient for optimum operation and safe behaviour. The thermo-mechanical analysis at 5 MW show that the thermal stresses induced in the fuel element will satisfy the design limits for mechanical strength and elastic stability.

1. Introdução

O reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP é um reator de pesquisa tipo piscina aberta, que vem operando nos últimos anos a uma potência de 2 MW. Água leve desmineralizada é usada como refrigerante e moderador e grafite como refletor. Os elementos combustíveis no reator são do tipo MTR, cuja maioria consiste de ligas de U-Al com 93,15% enriquecidas em U-235 (HEU) de fabricação americana. Na quarta carga do reator, 5 elementos combustíveis americanos foram substituídos por 5 elementos combustíveis alemães, contendo dispersões do tipo UAlx-Al com 19,77% enriquecidas em U-235 (LEU).

Com a restrição imposta ao comércio de urânio altamente enriquecido e integrando o programa mundial para redução do enriquecimento dos combustíveis de reatores de pesquisa, o IPEN-CNEN/SP iniciou a fabricação de elementos combustíveis tipo dispersão de U_3O_8 -Al com cerca de 19,90% enriquecidas em U-235. Embora fosse desejável que a conversão do núcleo do reator fosse realizada em uma única etapa, este processo vem sendo efetuado gradativamente no IPEN-CNEN/SP.

Em conexão com a conversão do núcleo do reator IEA-R1, cálculos térmicos e termo-hidráulicos foram desenvolvidos para o núcleo atual predominantemente HEU do reator e para um núcleo LEU proposto com combustíveis do tipo U_3O_8 -Al na potência de 2 MW. Os cálculos foram efetuados com o código HEATHYD [1] e modelos matemáticos sugeridos por diferentes organizações [2].

A conversão do núcleo pode ser utilizada como uma oportunidade para elevar a potência do reator para 5 MW. No seu projeto de concepção original [3], o reator IEA-R1 foi calculado para operação a 5 MW, o que fornece um aspecto atrativo para a elevação da potência, uma vez que a vazão atual no núcleo ($591,0 \text{ m}^3/\text{h}$) pode ser aumentada sem qualquer alteração no circuito primário de refrigeração. O valor de operação admitido na concepção original do reator foi de $681,5 \text{ m}^3/\text{h}$, com um valor de projeto de $817,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Sendo assim, cálculos térmicos e termo-hidráulicos foram também desenvolvidos na mesma formulação acima para o núcleo LEU proposto a 5 MW. Valores de vazão no núcleo de $681,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e $817,8 \text{ m}^3/\text{h}$ foram testados.

As placas combustíveis de elementos MTR são encaixadas nas placas laterais de suporte. Na hipótese de que estas sejam rígidas em relação às placas combustíveis, os gradientes térmicos nestas últimas podem induzir tensões acentuadas, levando a sua instabilidade. Para verificar as tensões térmicas induzidas no elemento combustível na potência de 5 MW, cálculos termo-mecânicos foram desenvolvidos através de uma modelagem em elementos finitos com o código ANSYS [4]. Os valores de tensão calculados foram comparados aos limites de resistência mecânica e estabilidade elástica estabelecidos em projeto.

2. Descrição do Núcleo HEU Atual e do Núcleo LEU Proposto para o Reator IEA-R1

O núcleo do reator IEA-R1 tem a forma de um paralelepípedo e é composto por elementos combustíveis, elementos de controle/segurança, elementos para irradiação de amostras e refletores de grafite encaixados verticalmente em furos de uma placa matriz de alumínio ($82,86 \text{ cm} \times 63,97 \text{ cm} \times 11,45 \text{ cm}$).

contendo 80 orifícios e formando um arranjo 8 x 10. Em média, um carregamento normal comporta 30 elementos combustíveis formando um arranjo 5 x 6. Destes elementos, 25 são elementos combustíveis padrão, 4 são elementos de controle/segurança e 1 elemento com região central vazada para irradiação de amostras.

Os elementos combustíveis padrão são do tipo MTR, formados por 18 placas planas paralelas com espessura média de 1,52 mm e dispostas em um estojo de alumínio com seção transversal de 79,7 mm x 76,1 mm. Os elementos de controle/segurança são formados por 12 placas combustíveis, ocupando a parte central do elemento. As 2ª e 17ª posições de placa são reservadas as barras absorvedoras de Ag-In-Cd. As posições restantes são ocupadas por placas de alumínio. O elemento de irradiação é composto de 9 placas combustíveis reunidas em grupos de 4 e 5, respectivamente, nas laterais do elemento. Com esta disposição, o elemento de irradiação apresenta um canal central de água.

Uma descrição geral do núcleo HEU atual do reator IEA-R1 (NÚCLEO 1) e do núcleo LEU proposto a 2 MW (NÚCLEO 2) e a 5 MW (NÚCLEO 3) é apresentada na Tabela 1.

O NÚCLEO 1 comporta 20 elementos combustíveis tipo U-Al HEU americano, 5 elementos combustíveis tipo UAlx-Al LEU alemão, 4 elementos de controle/segurança e 1 elemento de irradiação. As dimensões do cerne combustível nas placas combustíveis, respectivamente, americanas e alemãs são de 0,51 mm x 62,0 mm x 605 mm e 0,76 mm x 62,6 mm x 600 mm.

O núcleo LEU proposto (NÚCLEO 2 E NÚCLEO 3) deve comportar 20 elementos combustíveis tipo U₃O₈-Al de fabricação IPEN/CNEN-SP, 5 elementos combustíveis alemães e os mesmos elementos de controle/segurança e irradiação acima. As dimensões do cerne combustível de U₃O₈-Al são de 0,76 mm x 62,6 mm x 600 mm.

3. Métodos Utilizados nos Cálculos Térmicos, Termo-Hidráulicos e Termo-Mecânicos

No projeto térmico e termo-hidráulico dos elementos combustíveis tipo MTR, critérios (e limites) de projeto são estabelecidos de forma a não ocorrer uma mudança geométrica acentuada do elemento combustível e permitir o seu correto funcionamento durante o seu tempo de permanência no reator. As variáveis térmicas e termo-hidráulicas pesquisadas incluem a temperatura na superfície da placa combustível, a queda de pressão no núcleo, a velocidade crítica do refrigerante, os fluxos de calor para início da ebulição nucleada (onset of nucleate boiling-ONB), instabilidade no escoamento do fluido refrigerante e fluxo de calor crítico (burnout).

Em termos de critérios de projeto, as temperaturas na superfície da placa combustível devem ser mantidas abaixo da temperatura para a qual a probabilidade de corrosão do revestimento de alumínio é alta (cerca de 100 °C). A velocidade do fluido refrigerante deve ser mantida abaixo de 2/3 da velocidade crítica, dada por Miller [5], que é definida como aquela que torna o gradiente de pressão na placa combustível da ordem de sua carga crítica de flambagem. O fluxo de calor para o início da ebulição nucleada não é um critério limitante. Ele é normalmente identificado por considerações hidráulicas e de transferência de calor, isto é, escoamento bifásico versus escoamento monofásico. Instabilidades no escoamento do fluido refrigerante

Tabela 1. Descrição dos Parâmetros de Projeto do Núcleo Predominantemente HEU (NÚCLEO 1) e do Núcleo LEU Proposto a 2 MW (NÚCLEO 2) e a 5 MW (NÚCLEO 3) do Reator IEA-R1

PARÂMETROS DE PROJETO	NÚCLEO 1	NÚCLEO 2(NÚCLEO 3)
Tipo de reator	Piscina-MTR	Piscina-MTR
Potência regime permanente(MW)	2	2 (5)
Combustível	U-Al	²³⁵ U ₃ O ₈ -Al
	UALx-Al	UALx-Al
Enriquecimento do combustível	93,15%	19,90%
	19,77%	19,77%
Dimensões transversais do elemento combustível (mm)	79,7 x 76,1	79,7 x 76,1
Número de elementos combustíveis no núcleo	30	30
a) Elemento combustível padrão	25	25
b) Elemento de controle/segurança	4	4
c) Elemento de irradiação	1	1
Número de placas combustíveis		
a) Elemento combustível padrão	18	18
b) Elemento de Controle	12	12
c) Elemento de irradiação	9	9
Espessura da placa combustível (mm)	1,52	1,52
Dimensões do cerne combustível (mm)		
a) U-Al	0,51x62,0x605	
b) UAlx-Al	0,76x62,6x600	0,76x62,6x600
c) U ₃ O ₈ -Al		0,76x62,6x600
Espessura do canal de refrigeração(mm)	2,89	2,89
Largura do canal de refrigeração (mm)	66,58	66,58
Vazão do refrigerante (m ³ /h)	591,0	591,0 (681,5-817,8)

não podem ocorrer em um fluido monofásico exceto através de vibrações induzidas pelo fluido ou deformações no canal. Em fluidos bifásicos, a presença de vapor d'água saturado na forma de bolhas atua como um novo mecanismo que afeta a relação vazão-queda de pressão de uma maneira complexa. Quando a potência fornecida ao canal de refrigeração é aumentada, bolhas são formadas (ebulição subresfriada). Bolhas maiores eventualmente restringem a seção transversal do canal de refrigeração e forçam a aceleração da parte líquida de forma a manter a mesma vazão no canal. Esta aceleração leva a um aumento da queda de pressão, que restringe ainda mais o fluido, levando ao seu bloqueio. Para sistemas de baixa pressão com ebulição subresfriada, instabilidade no escoamento do fluido pode levar a um fluxo de calor crítico bem abaixo do obtido sob condição de escoamento estável. Então, o fluxo de calor crítico que ocorre sob escoamento instável torna-se o principal critério de projeto estabelecido para combustíveis MTR. Entretanto, dados sobre o fluxo de calor crítico sob condições de escoamento estável são também apresentados nos projetos de combustíveis MTR, desde que ele é um critério limitante.

Para o cálculo dos parâmetros térmicos e termo-hidráulicos do núcleo do reator IEA-R1 foi utilizado o código unidimensional em regime permanente HEATHYD. Ele modela a transferência de calor e a circulação do refrigerante nos elementos combustíveis MTR para qualquer distribuição axial de potência. Cálculos para a perda de pressão e para a velocidade do refrigerante são baseados nas correlações de Colebrook-White, levando em consideração o efeito dos mecanismos de realimentação na temperatura do refrigerante. Os modelos físicos de transferência de calor são desenvolvidos para escoamentos monofásico e bifásico, usando os critérios de transição para circulação forçada de Bergles-Rohsenow [2], [6]. Correlações para identificação do fluxo de calor para o início da instabilidade no escoamento do fluido são obtidos de Whittle e Forgan [2], [7] e os fluxos de calor crítico para condições de escoamento estável pelas correlações conservativas sugeridas por Mirshak e Labuntsov [2].

Os dados de entrada para o código HEATHYD incluem a geometria do elemento combustível, a potência gerada, a vazão no elemento, os fatores de pico de potência radiais e axiais, as propriedades do refrigerante e a pressão estática no reator. Os resultados de saída do código incluem a velocidade do refrigerante, a queda de pressão no núcleo, a temperatura e a pressão de saturação na saída do canal de refrigeração e as temperaturas locais no refrigerante e na superfície da placa combustível. O código calcula ainda os valores dos fluxos de calor para início da ebulição nucleada e instabilidade no escoamento do fluido, e o fluxo de calor crítico para escoamento estável. Cada um dos valores acima é dividido pelo fluxo de calor local na placa combustível, fornecendo as margens de segurança do reator, denominadas, respectivamente, de margem para ONB, margem para início da instabilidade no escoamento do fluido e margem para DNB. Valores de margem para ONB menores do que 1,0 podem ser admitidos em projeto. Os valores das margens para o início da instabilidade no escoamento do fluido têm de ser sempre maiores do que 1,0 para garantir a segurança do reator. Como descrito acima, o fluxo de calor que leva ao início da instabilidade no escoamento do fluido é o principal critério de projeto de combustíveis MTR.

A velocidade crítica do refrigerante não é fornecida pelo código HEATHYD.

Os valores destas velocidades para os três tipos de núcleos pesquisados foram calculados pela formulação de Miller e comparadas aos valores de velocidade do refrigerante obtidos pelo código HEATHYD.

As temperaturas no cerne combustível, obtidas em regime permanente não são limitantes para o projeto. No caso, elas são muito baixas e aquém de temperaturas que possam levar a fusão da placa ou a reações químicas entre as partículas dispersas e a matriz, como as que ocorrem entre o U_3O_8 e a matriz de alumínio. Apenas para diferenciar os diversos tipos de combustíveis, as temperaturas máximas no cerne combustível foram calculadas.

A análise termo-mecânica do elemento combustível a 5 MW é desenvolvida através de uma modelagem em elementos finitos com o código ANSYS. A distribuição de temperaturas aplicada como carregamento térmico é obtida dos resultados do código HEATHYD e representa a distribuição máxima de temperaturas na superfície da placa, obtida dos casos estudados a 5 MW. Para as tensões térmicas é adotado o critério do código ASME. Este critério limita a intensidade das tensões em um ponto (diferença algébrica entre a maior e a menor tensão principal) ao menor dos seguintes valores: a) tensão de ruptura do material; b) duas vezes a tensão de escoamento do material. Os limites de tensões adotados para as placas componentes do elemento combustível são:

- a) placas suportes laterais (material ASTM 6262 T6)
 - tensão de ruptura : 260 MPa
 - tensão de escoamento: 240 MPa

- b) placas combustíveis (material ASTM 1060)
 - tensão de ruptura : 55 MPa
 - tensão de escoamento: 15 MPa

As tensões de compressão nas placas combustíveis devem ser mantidas abaixo da sua carga crítica de flambagem.

4. Análise Térmica, Termo-Hidráulica e Termo-Mecânica do Reator IEA-R1

Os cálculos térmicos e termo-hidráulicos foram desenvolvidos com o código HEATHYD para os três tipos de núcleo apresentados na Tabela 1. A vazão atual no núcleo de $591,0 \text{ m}^3/\text{h}$ foi considerada nos cálculos desenvolvidos para o NÚCLEO 1 e para o NÚCLEO 2 na potência de 2 MW. Para o NÚCLEO 3 a 5 MW, os cálculos foram desenvolvidos para valores de vazão no núcleo de $681,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e $817,8 \text{ m}^3/\text{h}$, admitidos no projeto de concepção original do reator. As Tabelas 1 e 2 apresentam os dados de entrada utilizados pelo código HEATHYD. Os cálculos foram desenvolvidos para canal quente e na configuração atual do núcleo do reator IEA-R1, tanto para valores nominais de projeto como para tolerâncias na geometria e na densidade de urânio na placa. Os fatores de canal quente foram calculados pelo código CITATION, usando seções de choque geradas pelo código HAMMER, TECHNION [8]. A velocidade crítica do refrigerante e as temperaturas máximas no cerne da placa combustível foram obtidas por formulações matemáticas a parte, desde que o código HEATHYD não fornece estes parâmetros.

Tabela 2. Dados Utilizados nos Cálculos Térmicos e
Termo-Hidráulicos a 2 MW e a 5 MW

Parâmetro	NÚCLEO 1/NÚCLEO 2	NÚCLEO 3
Temperatura de entrada do refrigerante(°C)	28	38
Fator de pico axial	1,47	1,56
Fator de pico radial	1,67	1,56
Módulo de Elasticidade de Young(bar)	$0,7306 \times 10^6$	$0,7306 \times 10^6$
Razão de Poisson	0,33	0,33
Densidade da água (kg/m ³)	995,0	993,0
Calor específico da água (kJ/kg °C)	4,174	4,174
Condutividade térmica da água (W/m °C)	0,623	0,630
Condutividade térmica do alumínio(W/cm °C)	2,20	2,20
Condutividade térmica do U ₃ O ₈ (W/cm °C)	0,95	0,95
Condutividade térmica do U-Al(W/cm °C)	1,00	1,00
Condutividade térmica do UAlx-Al(W/cm °C)	1,70	1,70

Os valores da condutividade térmica dos diversos materiais nas placas combustíveis utilizados nos cálculos térmicos são apresentados na Tabela 2.

A Figura 1 apresenta os resultados de temperatura obtidos no refrigerante (tc) e na superfície das placas (tp) para o núcleo LEU proposto nas condições nominais de projeto a 2 MW e a 5 MW. Os resultados termo-hidráulicos são descritos na Tabela 3.

A distribuição de temperaturas obtidas para o NÚCLEO 3 a uma vazão de 681,5 m³/h (tp2) foi aplicada no elemento combustível na formulação desenvolvida com o código ANSYS. O modelo em elementos finitos proposto representa 1/8 do paralelepípedo formado pelas placas do elemento combustível (Fig.2). O gradiente de temperatura na direção radial é pequeno e foi desprezado.

5. Discussão dos Resultados e Conclusões

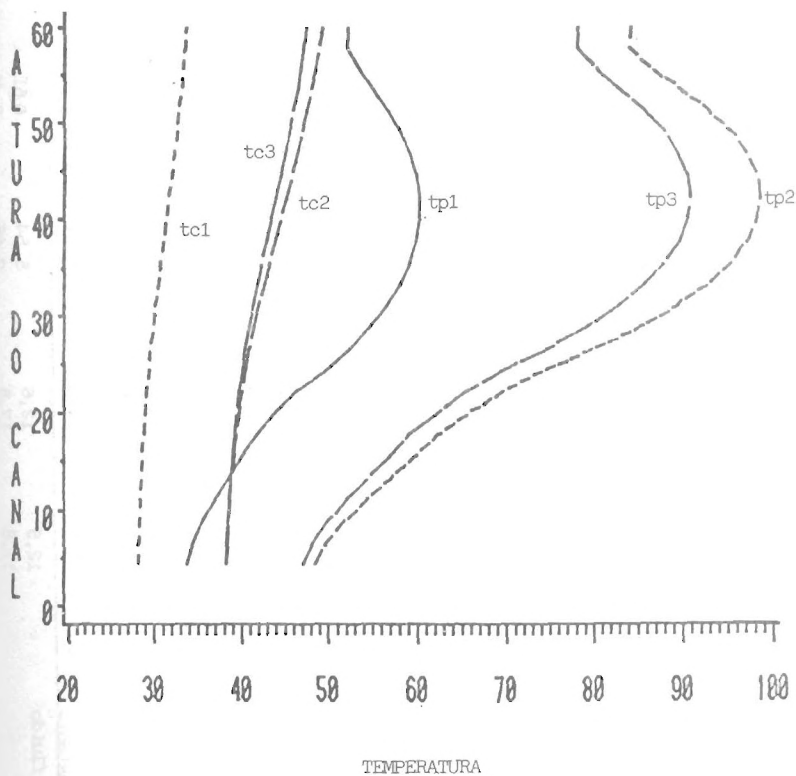
Da figura 1 e da tabela 3, nota-se que as diferenças nos resultados térmicos e termo-hidráulicos são mínimos para o núcleo predominantemente HEU atual e para o núcleo LEU proposto nas configurações estudadas a 2 MW. Pequenas discrepâncias nestes valores são devido as diferenças nas dimensões do cerne e do revestimento das placas combustíveis. Para as mesmas dimensões do canal de refrigeração nos dois tipos de núcleos, valores praticamente idênticos foram obtidos para a velocidade do refrigerante, queda de pressão e margens de segurança. A velocidade do refrigerante está bem abaixo da velocidade crítica e as temperaturas na superfície da placa aquém do limite estabelecido. As temperaturas máximas no cerne combustível são idênticas nos três tipos de placa. A margem de segurança obtida para o início da instabilidade no escoamento do fluido a 2 MW é muito alta, mostrando que a vazão atual no núcleo poderia ser reduzida.

A elevação da potência para 5 MW irá requerer um aumento da vazão no núcleo. O valor de projeto admitido na concepção original do reator é de 681,5 m³/h. A este valor as temperaturas na superfície da placa atingirão cerca de 100 °C dentro, portanto, do limite estabelecido. As margens de segurança são também suficientes para operação ótima e desempenho seguro. Um aumento na vazão até o valor de 817,8 m³/h levará a menores temperaturas na placa combustível e maiores margens de segurança, sem acarretar um aumento exagerado nas perdas de carga no núcleo. A velocidade do refrigerante ficará bem abaixo da velocidade crítica.

Os cálculos para canal quente a 5 MW, levando-se em conta as tolerâncias nas dimensões do elemento combustível e na densidade de urânio na placa, não acarretaram valores térmicos e termo-hidráulicos que ultrapassam limites de projeto estabelecidos.

Para cada elemento tipo IPEN-CNEN/SP introduzido no reator em substituição aos elementos americanos, devem ser repetidos os cálculos para os fatores de canal quente. Caso estes fatores sejam maiores do que os pesquisados neste trabalho, os cálculos térmicos e termo-hidráulicos devem ser refeitos e seus resultados comparados aos critérios de projeto estabelecidos.

Os resultados dos cálculos termo-mecânicos com o ANSYS mostram que a placa suporte lateral flexiona-se lateralmente absorvendo a expansão das



Superfície das Placas

tp1 - 2 MW

tp2 - 5 MW

tp3 - 5 MW

Refrigerante

tc1 - 2 MW

tc2 - 5 MW

tc3 - 5 MW

1 = 591,0 m³/h

2 = 681,5 m³/h

3 = 817,8 m³/h

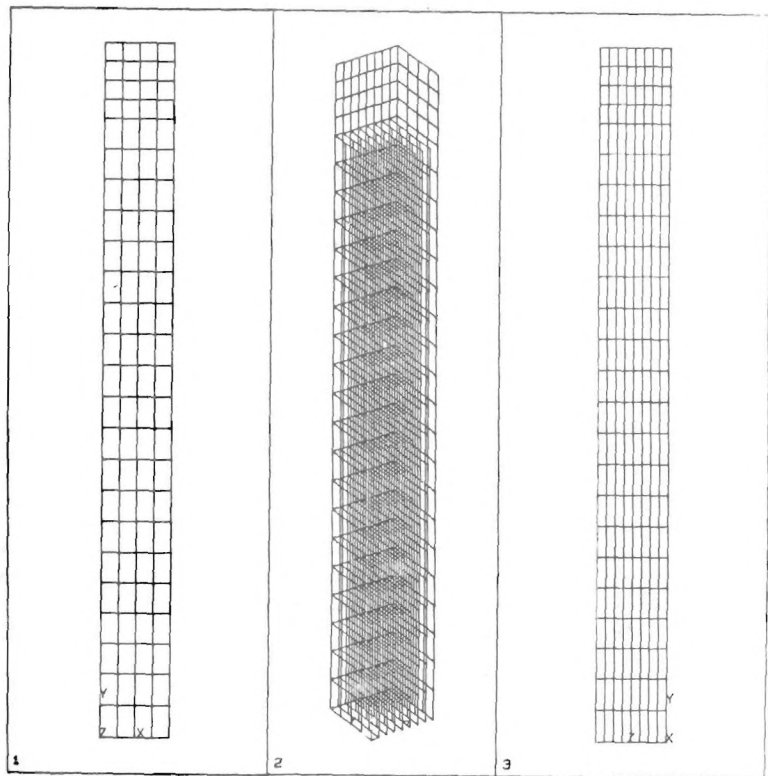
Temperatura (C) Altura do Canal (cm)

FIGURA 1

Perfil de Temperatura no Canal Quente

Tabela 3. Resultados da Análise Térmica e Termo-hidráulica do Núcleo HEU e LEU proposto do reator IEA-R1 a 2 MW e a 5 MW

Parâmetros		NÚCLEO 1	NÚCLEO 2	NÚCLEO 3	
Vazão no núcleo	(m ³ /h)	591,0	591,0	681,5	817,8
Vazão por elemento	(m ³ /h)	19,7	19,7	22,7	27,3
Velocidade do refrigerante	(m/s)	1,50	1,50	1,73	2,07
Velocidade crítica do refrigerante	(m/s)	16,5	15,7	15,8	15,8
Queda de Pressão					
a) entrada	(bar)	0,00323	0,00323	0,00428	0,00617
b) saída	(bar)	0,00181	0,00181	0,00241	0,00345
c) atrito	(bar)	0,03778	0,03779	0,04890	0,06947
d) gravidade	(bar)	0,06129	0,06129	0,06129	0,06129
e) dinâmica	(bar)	0,01115	0,01115	0,01477	0,02130
Pressão na saída do canal	(bar)	1,96	1,96	1,88	1,88
Temperatura de saturação	(C)	119,9	119,9	119,9	119,5
Temp. máxima no cerne combustível					
a) U-Al	(C)	61,6			
b) UAlx-Al	(C)	61,6	61,6	102,7	94,1
c) U ₃ O ₈ -Al	(C)		61,6	102,7	94,1
Fluxo de calor médio	(W/cm ²)	5,26	5,25	13,3	13,3
Fluxo de calor (máximo canal quente)	(W/cm ²)	12,9	12,9	31,2	31,2
Fluxo de calor médio para ONB	(W/cm ²)	15,9	15,9	17,8	20,7
Fluxo de calor para início da instabilidade no escoamento do fluido	(W/cm ²)	161,4	162,4	172,9	206,1
Fluxo para DNB (Mirshak)	(W/cm ²)	229,3	229,4	239,0	262,5
Margens de segurança					
a) margem para ONB		3,02	3,03	1,34	1,56
b) margem para início da instabilidade no escoamento do fluido		12,5	12,6	5,54	6,61
c) margem para DNB		17,8	17,8	7,66	8,41



- 1 - Discretização das placas combustíveis
- 2 - Vista em perspectiva do modelo
- 3 - Discretização da placa suporte lateral

Figura 2

Modelo em Elementos Finitos do Elemento Combustível

placas combustíveis. Disto resulta que as tensões de compressão, segundo a largura das placas combustíveis são baixas e não levam à falha por instabilidade elástica. As maiores tensões de compressão são obtidas nas placas combustíveis, segundo a direção longitudinal do elemento combustível. Nesta direção, as placas suportes laterais restringem a expansão das placas combustíveis e, em contrapartida, surgem tensões de tração segundo a mesma direção nas placas suportes laterais. Nas extremidades longitudinais das placas combustíveis, fora da altura ativa, surgem tensões de tração devido a estas estarem a uma temperatura inferior e, portanto, sendo tracionadas pela parte da placa adjacente, ao longo da altura ativa, que está a uma temperatura superior.

A máxima intensidade de tensões encontrada para as placas suportes laterais foi de 45 MPa e para as placas combustíveis foi de 20 MPa. Estes valores são, portanto, inferiores aos limites descritos no capítulo 3.

As tensões de compressão encontradas na análise estão abaixo das tensões críticas de flambagem calculadas para as placas combustíveis na direção longitudinal (122 MPa) e na direção da largura das placas (31 MPa).

6. Referências

- [1] L.A. KHAN e R. NABBI, Heat Transfer Analysis of the Existing HEU and Proposed LEU cores of Pakistan Research Reactores, J111 - 2118 KFA, February (1987).
- [2] IAEA-TECDOC-233, International Atomic Energy Agency, Vienna (1980).
- [3] Open-Pool Research Reactor, IEA-São Paulo, the Babcock and Wilcox Co., New York, N.Y., August (1957).
- [4] G.J. DE SALVO e J.A. SWANSON, ANSYS: Engineering Analysis System, Users Manual, Rev. 4.2, Swanson Analysis Systems Inc. Houston, PA - USA (1985).
- [5] D.R. MILLER, Critical Flow Velocities for Collapse of Reactor Parallel Plate Fuel Assemblies, Trans. ASME, 1958.
- [6] A.E. BERGLES e W.M. ROHSENOW, The Determination of Forced-Convection Surface-Boiling Heat Transfer, Transactions of the ASME 86 (Series C-Journal of Heat Transfer) (1964).
- [7] R. H. WHITTLE e R. FORGAN, A Correlation for the Minima in the Pressure Drop versus Flow Rate Curves for Subcooled Water Flowing in Narrow Heated Channels, Nuclear Engineering and Design, vol-6 (1967).
- [8] N. KOSAKA, Comunicação Pessoal (1988).