

DIMENSIONAMENTO TERMO-HIDRÁULICO DE UM DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO DE MINI-PLACAS COMBUSTÍVEIS PARA O REATOR IEA-R1

Pedro Ernesto Umbehaun, Delvonei Alves de Andrade, Walmir Maximo Torres e Mitsuo Yamaguchi

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Av. Prof. Lineu Prestes 2.242
05508-000 Butantã, São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta o procedimento para o dimensionamento de um dispositivo de irradiação de mini-placas, semelhantes às utilizadas na fabricação de elementos combustíveis do tipo MTR utilizados em reatores de pesquisa do tipo piscina como o IEA-R1 do IPEN. Para tal, foi desenvolvido um modelo termo-hidráulico considerando os aspectos geométricos e de materiais para o cálculo da distribuição de temperatura nas mini-placas. Utilizou-se o pacote "Engineering Equation Solver – EES" para resolução das equações. Foi feito um estudo paramétrico para verificar o comportamento da temperatura considerando a posição do dispositivo no núcleo do reator, concentração e distribuição de urânio, largura ativa das mini-placas e a vazão de resfriamento.

São apresentados os resultados desta análise através dos quais obteve-se informações relativas ao posicionamento ideal do dispositivo no núcleo, bem como a vazão necessária ao seu resfriamento atendendo ao limite de temperatura de 95 °C imposto para a superfície do revestimento das mini-placas. Um estudo experimental será realizado futuramente com o intuito de dimensionar uma restrição de vazão para o dispositivo de forma a atender a vazão requerida de acordo com a análise apresentada, evitando o sobreaquecimento das mini-placas por falta de vazão, assim como evitando um desvio excessivo de vazão do núcleo.

Keywords: thermal hydraulics, mini-plates, fuel irradiation, irradiation device.

I. INTRODUÇÃO

Dispositivos de irradiação de mini-placas são usados para fornecer material para estudos de pós-irradiação para a qualificação de placas combustíveis usadas em elementos combustíveis do tipo MTR (Materials Testing Reactor) utilizados em reatores de pesquisa do tipo piscina como o IEA-R1. O dispositivo de irradiação possui dimensões externas próximas às de um MTR, porém, em seu interior são encaixadas as mini-placas combustíveis, que podem ser retiradas para inspeção e análise após sua irradiação. As placas que serão irradiadas no reator IEA-R1 possuem características similares às de uma placa combustível, que contém em seu interior o elemento fissil ^{235}U , que pode se apresentar na forma de liga metálica (U-Al) ou na forma de dispersões de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ ou $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ e revestimento de alumínio. Esse dispositivo é posicionado na placa matriz, fora do núcleo ativo, onde é deixado para irradiação por um intervalo de tempo até que atinja a queima desejada. O calor gerado nestas mini-placas decorrente das reações de fissão nuclear deve ser removido. A remoção segura desse calor é avaliada com a análise termo-hidráulica do dispositivo, onde são verificadas as margens de segurança. Para realizar a análise é necessário o conhecimento da geometria e materiais do dispositivo e das mini-placas, do fluxo de calor e da vazão que atravessa o mesmo. Vazões elevadas através do dispositivo produzem margens de

segurança elevadas, contudo, reduzem a vazão no núcleo ativo, enquanto que vazões muito pequenas podem ser insuficientes para remover o calor e provocar danos às mini-placas.

Este trabalho apresenta o modelo termo-hidráulico proposto para o problema e utiliza-se o pacote "Engineering Equation Solver – EES"[1] na solução das equações. No intuito de determinar a vazão mínima necessária para o resfriamento das mini-placas e consequentemente reduzir o desvio de vazão do núcleo ativo, foram realizadas várias análises paramétricas, através deste modelo, de forma a respeitar o limite de temperatura de 95°C estabelecido para a superfície das mini-placas.

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O IEA-R1 é um reator de pesquisas do tipo piscina, que pode operar até 5 MW, e utiliza em seu núcleo elementos combustíveis do tipo placa plana (MTR).

O escoamento do fluido refrigerante no núcleo se dá no sentido descendente, promovido pela bomba principal, provocando o escoamento do fluido refrigerante através dos elementos combustíveis padrão e de controle, dispositivos de irradiação que permitem a passagem de água, furos secundários não tamponados da placa matriz, canais entre

elementos combustíveis e canais entre refletores e irradiadores.

O escoamento pelos canais dos elementos combustíveis padrão e de controle promove o resfriamento das placas combustíveis internas; o escoamento através dos canais entre elementos promove o resfriamento das faces externas das placas combustíveis laterais; o escoamento pelos canais entre refletores e irradiadores tem por finalidade principal evitar a estagnação de fluido refrigerante e o escoamento pelos furos principais e secundários não tamponados não têm finalidade e desviam parte da vazão que deveria estar passando pelos canais ou irradiadores onde há geração de calor.

A introdução deste dispositivo de irradiação no núcleo certamente desviará parte da vazão de resfriamento do núcleo, tornando importante a análise termo-hidráulica do mesmo, de tal forma a garantir seu resfriamento, sem por outro lado desviar um valor muito acima do necessário, minimizando assim o impacto no resfriamento do núcleo.

III. MODELO TERMO-HIDRÁULICO

O dispositivo é formado por 2 conjuntos de 5 mini-placas cada, Fig. 1. A espessura de cada mini-placa é de 1,52 mm com canal de refrigeração entre placas de 3,7 mm, formando 11 canais de escoamento. A altura ativa do dispositivo é 136 mm, no entanto, foi considerada no modelo uma altura de 140 mm. As mini-placas são fabricadas com largura ativa de 20 mm e 40 mm.

O cálculo das distribuições de densidades de potência nas mini-placas foi realizado com os programas HAMMER-TECHNION [2] para geração de seções de choque e CITATION [3] para cálculo do núcleo. Foi adotada a configuração apresentada na Fig. 2, onde estão indicadas as três posições (26, 36 e 37 da placa matriz – regiões 1 e 2) que podem ser utilizadas para colocar o dispositivo irradiador de mini-placas.

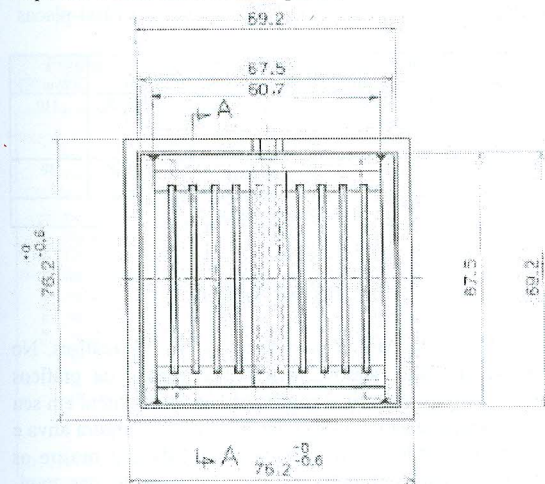


Figura 1. Detalhes do Dispositivo (Seção Transversal).

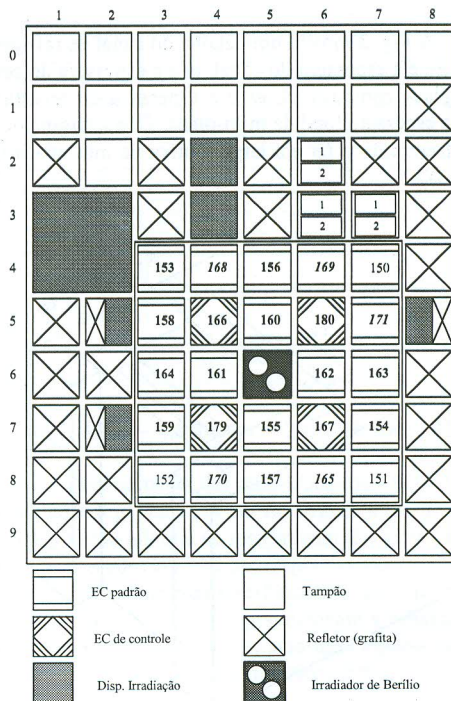


Figura 2. Configuração Utilizada.

A Tabela 1 apresenta a distribuição axial de densidade de potência para as mini-placas contendo dispersões de U_3O_8-Al , com densidade de 3,0 gU/cm³, e U_3Si_2-Al , com densidades de 3,0 gU/cm³ e 4,8 gU/cm³, que apresentaram as condições mais severas considerando o reator operando a 5 MW e para uma largura ativa de 2 cm. As mini-placas foram discretizadas em sete nós axiais tanto para a região 1 quanto para a região 2 (Fig. 2).

TABELA 1. Posição 36 – 2 cm de Largura

Nó axial	Densidade de Potência (W/cm ³)					
	$U_3O_8 - 3,0 \text{ gU/cm}^3$		$U_3Si_2 - 3,0 \text{ gU/cm}^3$		$U_3Si_2 - 4,8 \text{ gU/cm}^3$	
	Região 1	Região 2	Região 1	Região 2	Região 1	Região 2
1	88,98	99,74	88,82	99,54	116,74	131,14
2	85,65	96,36	85,48	96,15	110,78	124,95
3	84,83	95,64	84,65	95,42	109,35	123,64
4	84,22	95,08	84,05	94,86	108,49	122,83
5	83,45	94,21	83,28	93,99	107,57	121,79
6	82,84	93,42	82,68	93,21	107,14	121,14
7	84,50	95,01	84,34	94,82	110,83	124,90

A Fig. 3 mostra um detalhe do canal de refrigeração, onde E_c é a espessura do canal, e_f é a espessura do cerne da mini-placa combustível, e_r é a espessura do revestimento, E_p é a espessura total da mini-placa, L_c é a largura do canal de refrigeração e L_p é a largura ativa da mini-placa (20 ou 40 mm).

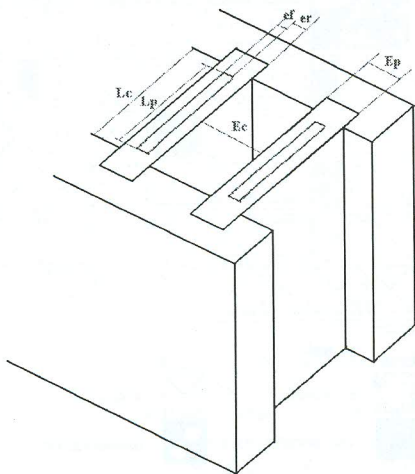


Figura 3. Detalhes de um Canal de Refrigeração.

A Fig. 4 apresenta um esquema simplificado do modelo proposto. Com a simetria térmica e geométrica do modelo, o canal central é responsável pela remoção de calor de duas meia-placas e os dois meio-canais laterais pela remoção de calor de meia-placa cada um. O modelo térmico utilizado é uma versão adaptada do Modelo Térmico de Resfriamento de Canais do Reator (MTRCR-IEAR1 [4]).

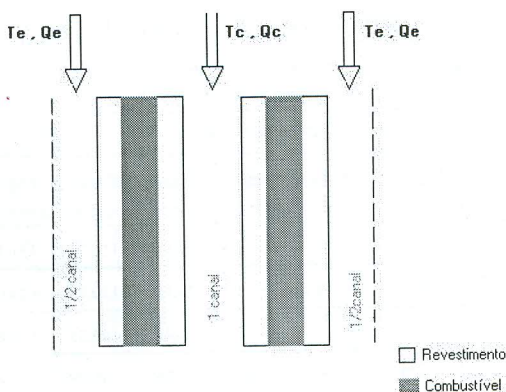


Figura 4. Esquema Simplificado do Modelo.

As trocas térmicas consideradas no modelo são:

- condução de calor transversal nas placas combustíveis,
- convecção entre a superfície externa do revestimento e o fluido em escoamento,
- transporte entálpico devido ao escoamento fluido.

Devido a geometria a condução de calor axial nas placas não foi considerada. No fluido refrigerante apenas convecção. As propriedades térmicas das mini-placas são consideradas constantes com a temperatura.

São definidas as seguintes condições de contorno na entrada dos canais:

- temperatura de entrada do fluido refrigerante,
- vazão volumétrica do fluido refrigerante (variável parametrizada no modelo).

É ainda definida a temperatura máxima de entrada do fluido refrigerante : 40 °C e a temperatura máxima da superfície do revestimento das mini-placas: 95 °C.

As análises apresentadas no presente trabalho foram realizadas em condições de regime permanente, considerando-se as incertezas de fabricação, modelo neutrônico, sobrepotência, cálculo do coeficiente de película, etc.. resultando num fator de canal quente $f = 1,674$, que implica nas maiores temperaturas, conforme Umbehaun, P. E. [5]. No cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção utilizou-se a correlação de Dittus-Boelter [6] com correção de viscosidade em função de temperatura. Assume-se ainda que as dez posições no irradiador sempre estão preenchidas.

Finalmente, ressalta-se que a temperatura para uma seção transversal de um volume fluido é considerada homogênea, para o modelo proposto.

A Tabela 2 apresenta a condutividade térmica das mini-placas para as diferentes composições e densidades do combustível utilizado na fabricação das mesmas.

TABELA 2. Composição do Combustível das Mini-placas

Combustível	U_3O_8 -Al	k (W/m °C)	U_3Si_2 -Al	k (W/m °C)
3.0 gU/cm ³	45% vol de U_3O_8 55% vol de Al	35*	27% vol de U_3Si_2 73% vol de Al	110
4.8 gU/cm ³	-	-	45% vol de U_3Si_2 55% vol de Al	50

* IAEA-TECDOC-643[7]

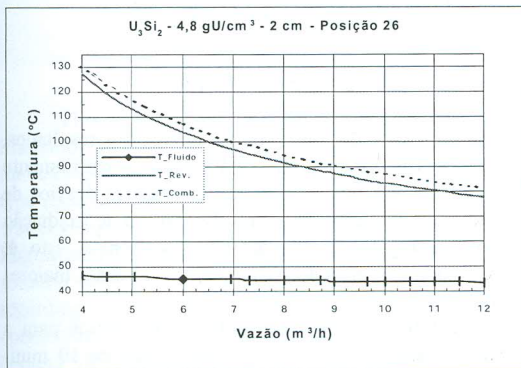
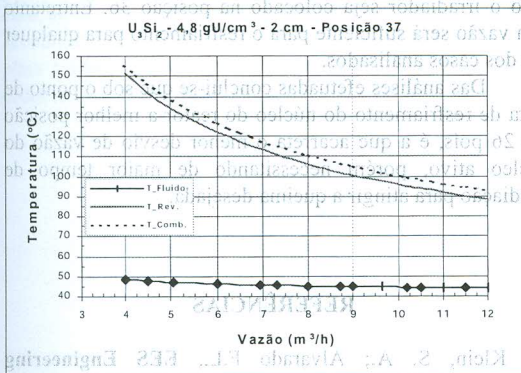
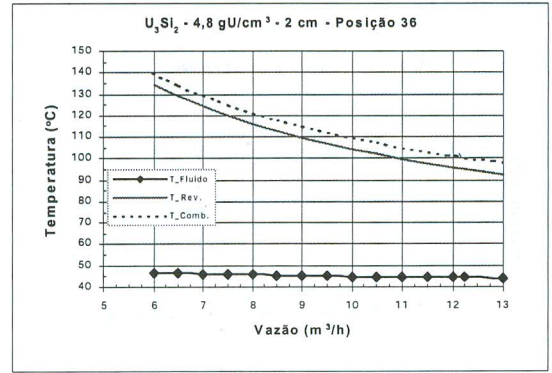
IV. RESULTADOS

O estudo paramétrico resultou em 18 análises. No presente trabalho serão apresentados apenas os gráficos obtidos para as análises das mini-placas que contêm em seu interior dispersões de U_3Si_2 com 2 e 4 cm de largura ativa e densidade de 4,8 gU/cm³, embora a Tabela 3 mostre os valores de vazão mínima para o resfriamento das mini-placas para todos os casos.

TABELA 3. Vazão Mínima Requerida

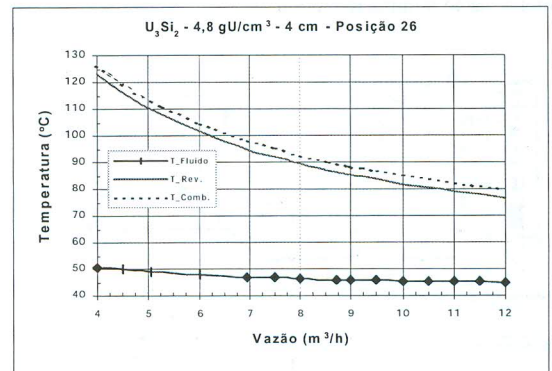
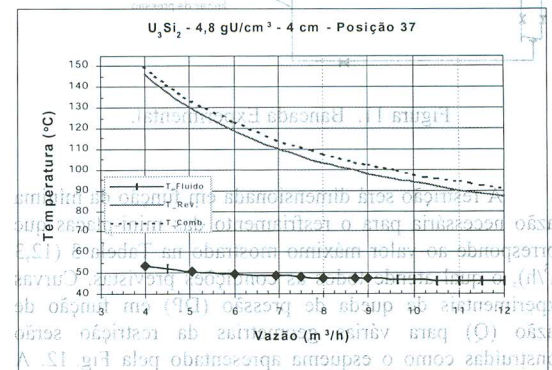
Largura da mini-placa (cm)	Posição no núcleo	U_3O_8-Al 3,0 gU/cm ³ Q mínimo (m ³ /h)	U_3Si_2-Al 3,0 gU/cm ³ Q mínimo (m ³ /h)	U_3Si_2-Al 4,8 gU/cm ³ Q mínimo (m ³ /h)
2	26	3,8	5,2	7,3
2	37	7,1	7,2	10,2
2	36	8,7	8,7	12,3
4	26	5,1	5,1	7,0
4	37	7,1	7,0	9,7
4	36	8,7	8,7	12,0

A Tabela 3 apresenta os resultados de vazão mínima para todas as condições analisadas e observa-se que os valores mais críticos de vazão ocorrem quando as mini-placas são fabricadas de U_3Si_2-Al com densidade de 4,8 gU/cm³, tanto para 2 quanto para 4 cm de largura ativa.

Figura 5. $U_3Si_2 - 4,8 \text{ gU/cm}^3 - 2 \text{ cm} - \text{Posição } 26$.Figura 6. $U_3Si_2 - 4,8 \text{ gU/cm}^3 - 2 \text{ cm} - \text{Posição } 37$.Figura 7. $U_3Si_2 - 4,8 \text{ gU/cm}^3 - 2 \text{ cm} - \text{Posição } 36$.

Para o resfriamento das mini-placas de U_3Si_2-Al com densidade de 4,8 gU/cm³ e 4 cm de largura ativa, (Figuras 8, 9 e 10), a vazão mínima de resfriamento é 7,0, 9,7 e 12,0 m³/h para as posições 26, 37 e 36, respectivamente.

A vazão mínima para o resfriamento das mini-placas de U_3Si_2-Al com 4,8 gU/cm³ é praticamente a mesma para as duas larguras ativas (2 e 4 cm) para uma mesma posição de irradiação; com uma variação inferior a 5 %.

Figura 8. $U_3Si_2 - 4,8 \text{ gU/cm}^3 - 4 \text{ cm} - \text{Posição } 26$.Figura 9. $U_3Si_2 - 4,8 \text{ gU/cm}^3 - 4 \text{ cm} - \text{Posição } 37$.

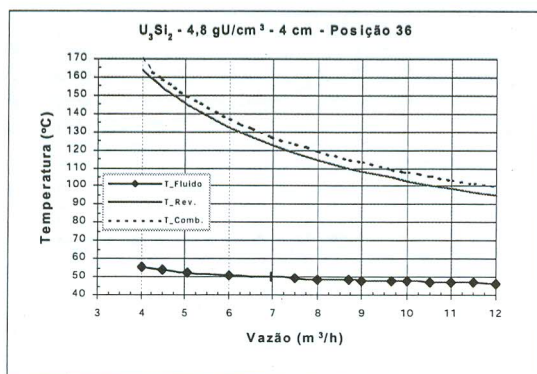


Figura 10. $U_3Si_2 - 4,8 \text{ gU/cm}^3 - 4 \text{ cm} - \text{Posição } 36$.

Para o estabelecimento correto da vazão mínima desejada está previsto uma série de experimentos com o dispositivo de irradiação, os quais serão realizados numa bancada experimental conforme a Fig. 11.

O objetivo desses experimentos é dimensionar uma peça (restrição) a ser montada no dispositivo de tal forma a obter a vazão mínima requerida.

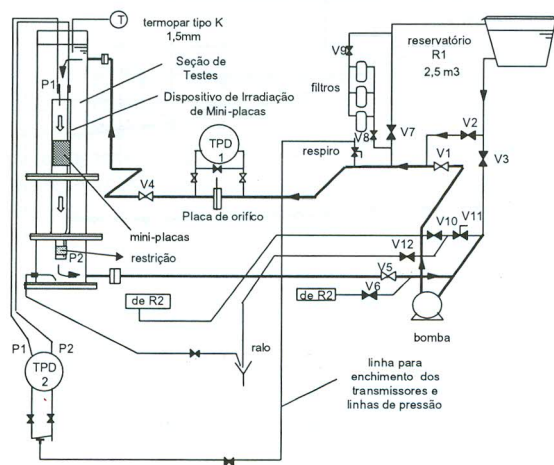


Figura 11. Bancada Experimental.

A restrição será dimensionada em função da mínima vazão necessária para o resfriamento das mini-placas que corresponde ao valor máximo mostrado na Tabela 3 ($12,3 \text{ m}^3/\text{h}$), o qual atende todas as condições previstas. Curvas experimentais de queda de pressão (DP) em função de vazão (Q) para várias geometrias da restrição serão construídas como o esquema apresentado pela Fig. 12. A geometria da restrição será obtida igualando-se a queda de pressão no núcleo do reator com a queda de pressão no

dispositivo, isto é, $DP = A * Q^B$, desta forma obtendo-se a vazão requerida, onde A e B são constantes a serem determinadas em função da geometria da restrição.

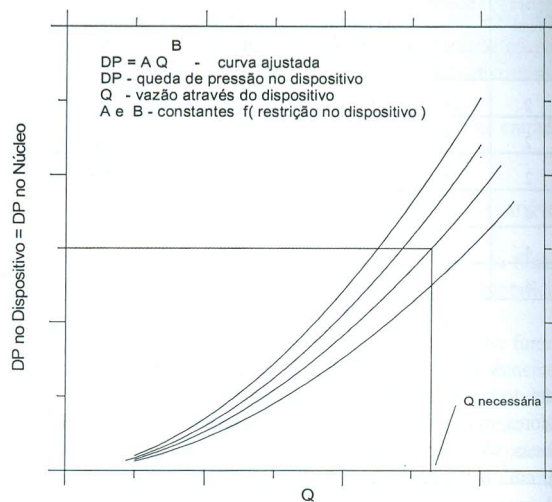


Figura 12. Queda de Pressão x Vazão.

V. CONCLUSÕES

Como esperado, observou-se através dos resultados, que os maiores valores de vazão para o resfriamento adequado das mini-placas, portanto os maiores desvios de vazão do núcleo ocorreram para o dispositivo de irradiação colocado na região de maior fluxo neutrônico, isto é, posições mais próximas ao núcleo ativo, e para a maiores densidades de urânio.

A condição crítica de irradiação foi obtida para a situação em que são irradiadas simultaneamente 10 mini-placas de U_3Si_2-Al com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ e com 2 cm de largura ativa. Nesta situação a vazão pelo irradiador de mini-placas deverá ser calibrada, experimentalmente, para $12,3 \text{ m}^3/\text{h}$ caso o irradiador seja colocado na posição 36. Entretanto esta vazão será suficiente para o resfriamento para qualquer um dos casos analisados.

Das análises efetuadas conclui-se que sob o ponto de vista de resfriamento do núcleo do reator a melhor posição é a 26 pois, é a que acarreta o menor desvio de vazão do núcleo ativo, porém necessitando de maior tempo de irradiação para atingir a queima desejada.

REFERÊNCIAS

- [1] Klein, S. A.; Alvarado F.L., **EES Engineering equation solver for the microsoft windows operating system**, Version 4.334W Dec. 1996. Middleton, WI. :F-Chart Software, 1992.

[2] Barhen, J.; Rhotenstein, W. and Taviv, E., **The HAMMER Code System Technion**, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, NP-565, 1978.

[3] Fowler, T. B.; Vondy, D. R. and Cunningham, G. W., **Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION**, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-2496, Ver. 2, July, 1971.

[4] Umbehaun, P. E.; Andrade, D. A., **Relatório Técnico – RELT.001.R00 – “Reavaliação das Condições Termo-Hidráulicas do Núcleo do Reator IEA-R1 para produção de Molibdênio**, São Paulo, 1999.

[5] Umbehaun, P. E., **Metodologia para Análise Termo-Hidráulica de Reatores de Pesquisa Tipo Piscina com Combustível Tipo Placa**, Dissertação de Mestrado, São Paulo, 2000.

[6] Özisik, M. N., **Transferência de Calor – Um Texto Básico**, Ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1990.

[7] TECDOC-643, **Research Reactor Core Conversion Guidebook**, IAEA, Viena, 1992.

ABSTRACT

This paper presents a procedure for dimensioning an irradiation mini-plates device which will be used in MTR fuel elements similar to those used in pool research reactor type such as IEA-R1 or IPEN. A thermal hydraulics model was developed regarding the device geometry and materials. Engineering Equation Solver – EES pack is used for the solution of the equation system. A parametric study regarding the geometry, device position, uranium concentration and distribution, mini-plates active width and cooling flow was carried out to verify the temperature behavior.

Through the main results presented here, it was possible to define the device ideal position in the reactor core, as well as the flow necessary to its cooling taking into account the temperature limit of 95 °C, imposed to the mini-plate surfaces. A set of experiments will be performed in order to design a restriction for the required flow.