

DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS EM PLACAS AQUECIDAS ELETRICAMENTE E RESFRIADAS POR ASPERSÃO

Walmir Maximo Torres, Benedito Dias Baptista Filho, Daniel Kao Sun Ting e
Mauro Onofre Martins
Diretoria de Reatores
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
05508-900 - São Paulo - SP - Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de um experimento para estudo do processo de resfriamento por aspersão de placas aquecidas eletricamente. O experimento e a seção de testes simulam as condições que podem existir nas placas combustíveis do reator nuclear de pesquisas IEA-R1m no caso de um acidente de perda de refrigerante com descobrimento total do núcleo. Um modelo numérico simples foi desenvolvido para dar suporte à análise e interpretação do comportamento das temperaturas medidas nas placas. O modelo resolve a equação de energia numa placa em condições semelhantes aquelas proporcionadas pelo sistema de aspersão e permite avaliar o efeito da diferença de materiais das placas usadas no experimento e das placas combustíveis nos gradientes de temperaturas.

INTRODUÇÃO

O IEA-R1m é um reator de pesquisas do tipo piscina de 5 MW que utiliza elementos combustíveis do tipo MTR (Materials Testing Reactor) com placas planas. Estudos experimentais realizados por Webster (1967) indicaram que para esse tipo de reator, com potências de operação acima de 3 MW, existe a necessidade de um Sistema de Resfriamento de Emergência por Aspersão (SRE) para atuar no caso de um acidente de perda de refrigerante de grandes proporções onde possa ocorrer o descobrimento do núcleo. A função desse sistema é resfriar os elementos combustíveis, retirando o calor gerado pelo decaimento radioativo, até que os níveis de fluxo de calor sejam suficientemente baixos para que o resfriamento possa ser feito por convecção natural do ar. Apesar de originalmente ser projetado para operar a 5 MW, o reator IEA-R1m tem operado desde a sua inauguração (1957) com potência máxima de 2 MW. Porém, em meados de 1995, foi decidido que o reator deveria operar na potência de projeto (5 MW), aumentando assim a sua capacidade de produção e experimental. Na época do projeto do reator não foi previsto um SRE, que então teve que ser projetado e implementado em 1997, para que o reator pudesse operar nas novas condições.

Este trabalho apresenta o experimento e a seção de testes desenvolvidos para avaliar a efetividade do sistema de aspersão no resfriamento do núcleo e fornecer dados para a certificação do sistema.

O trabalho ressalta um aspecto fenomenológico do resfriamento das placas por aspersão, descrevendo alguns pontos observados durante os testes. É descrito também, um modelo numérico desenvolvido para auxiliar na interpretação do comportamento das temperaturas nas placas. O modelo resolve a equação de energia, em duas dimensões, numa placa resfriada em condições semelhantes àsquelas observadas durante os testes experimentais. O modelo avalia a influência do material das placas nos gradientes de temperaturas e indica que para as placas combustíveis podem ser esperadas temperaturas bem menores do que aquelas observadas no experimento.

PARÂMETROS DE PROJETO DO EXPERIMENTO

Para definir os parâmetros de projeto do experimento é necessário conhecer as condições de fluxo de calor de decaimento no núcleo e como este se distribui, após o esvaziamento da piscina.

Um reator de pesquisas de 5 MW com núcleo formado por 21 elementos combustíveis com 18 placas e 4 elementos de controle com 12 placas, dispostos em um arranjo 5x5, após ter operado por tempo infinito, apresenta a curva de potência de calor de decaimento mostrada na Fig.1. A curva, calculada usando o código ORIGEN (Croff, 1980), considera um acréscimo de 20% durante todo o período de decaimento. Esse calor não é uniformemente distribuído no núcleo, existindo uma distribuição radial e axial. A distribuição axial normalizada, calculada usando o código LEOPARD (Kerr et al., 1991), modificado para cálculos em reatores com combustível do tipo placa, e CITATION (Flowler et al.,1971), pode ser vista na Fig. 2. Assume-se, para fins de dimensionamento do sistema e execução do experimento, um acréscimo de 10% no fator de pico do canal quente, normalmente considerado para levar em conta as incertezas de cálculo, e também que esses perfis se mantenham durante o período de decaimento, com o nível de potência diminuindo de acordo com a curva de decaimento da Fig. 1.

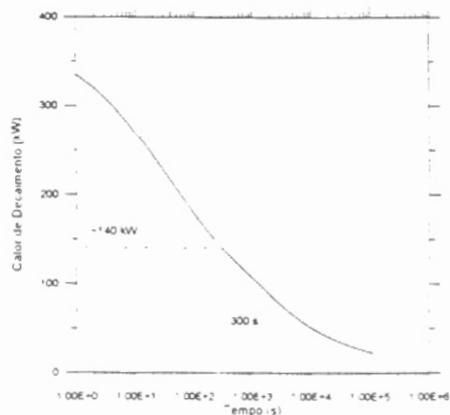


Fig. 1. Curva de Calor de Decaimento para o Reator a 5 MW

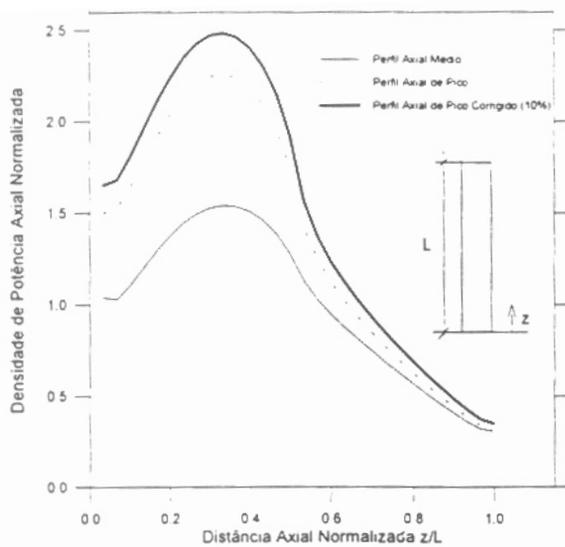


Fig. 2. Perfil de Potência Axial Normalizado do Reator IEA-R1m

O intervalo de tempo para o esvaziamento da piscina do reator, considerando um acidente de perda de refrigerante de grandes proporções, foi calculado por Mapplelian (1997). Os cálculos mostraram que esse intervalo de tempo é de aproximadamente 300s, momento em que a potência de decaimento é da ordem de 140 kW (Fig. 1) e o máximo fluxo de calor no canal quente é $1,13\text{W/cm}^2$, já considerados os fatores de segurança. Portanto, as condições térmicas em $t=300\text{s}$ serão consideradas como condições iniciais para o transiente nos testes experimentais.

Como ponto de partida para o desenvolvimento do experimento foram utilizados os resultados de Parkanski (1992), que realizou testes com 4 placas aquecidas eletricamente e fluxo de calor uniforme, obtendo as temperaturas máximas nas placas, em condições estacionárias, como função do fluxo de calor para diversas condições de resfriamento, mostradas na Fig. 3. Observa-se dessas curvas que é possível, com vazões de aspersão entre 30 e 45 $\text{cm}^3/\text{min}/\text{placa}$, resfriar placas parcialmente submersas sujeitas a fluxos de calor de até $4,5\text{W/cm}^2$, sem que a temperatura suba acima de 108°C . Esses resultados foram usados no desenvolvimento do sistema de resfriamento de emergência do reator argentino RP-10 de 10 MW, que usa combustíveis de placas do tipo MTR semelhantes aos do IEA-R1m.

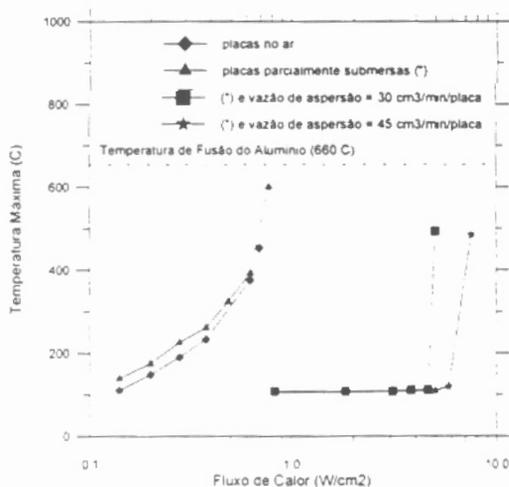


Fig. 3. Temperatura Máxima nas Placas versus do Fluxo de Calor

O experimento foi projetado com o objetivo de demonstrar a efetividade do sistema de aspersão no resfriamento de um elemento combustível sujeito às condições que podem existir no evento de um acidente de perda de refrigerante. Para isso, foi projetada a seção de testes (STAR - Seção de Testes Aquecida do Reator), mostrada na Fig. 4. A região aquecida e formada por 4 placas, ligadas eletricamente em série, que simulam as placas combustíveis e os canais de 2,89 mm existentes entre elas. As placas de $(625 \times 59 \times 1,4\text{ mm})$ são de uma liga de 80% Ni e 20% Cr. Foram soldados 10 termopares do tipo K não aterrados, com bainha em aço inoxidável e 0,5 mm de diâmetro externo nas 2 placas centrais. O posicionamento e a identificação dos termopares nas placas 2 e 3, podem ser vistos na Fig. 5. As placas foram montadas no centro de um perfil quadrado de alumínio de $(76,2 \times 76,2\text{ mm})$, e isoladas eletricamente deste, por Celeron. Para representar a geometria do elemento combustível tipo MTR, foram adicionadas 12 placas de alumínio de 1,58 mm sem aquecimento. A alimentação elétrica para a seção de testes foi proporcionada por um retificador de tensão com capacidade para 24 kW (12VCC ; 2000A), que permite ajustes de tensão na forma de degraus de aproximadamente 0,5V. Para a aquisição dos dados experimentais de temperatura foi usado um sistema de aquisição de dados (SAD) da National Instruments e software LabWindows e dois medidores portáteis com capacidade para 5 termopares cada.

O experimento térmico foi realizado no circuito experimental mostrado na Fig. 6. Para representar a região do núcleo do reator foi montado um conjunto constituído por 72 simuladores, num arranjo 9×8 , que representam os elementos combustíveis, elementos de controle, câmara de irradiação e refletores de grafite, todos construídos em perfil quadrado de alumínio de $(76,2 \times 76,2\text{ mm})$. Esse conjunto foi montado inicialmente para a realização de experimentos de distribuição de vazão de aspersão sobre o núcleo, realizados por Torres (1997), para a verificação dos efeitos de sombreamento provocados pelos elementos de controle sobre os elementos combustíveis. A seção de testes STAR foi instalada entre 2 elementos de controle, possibilitando assim a execução dos testes em condições mais realísticas, ou seja, considerando os piores efeitos de sombreamento. Um distribuidor de vazão de aspersão em forma de U foi montado no circuito envolvendo o conjunto que representa o núcleo. Esse distribuidor possui 7 bicos aspersores selecionados e posicionados com base nos resultados dos experimentos de distribuição de vazão de aspersão no núcleo.

TESTE STAR52

Para ilustrar algumas observações feitas durante o processo de resfriamento das placas pela aspersão de água, foram escolhidos os resultados referentes ao teste STAR52. Neste teste foram simuladas, com fluxo de calor uniforme (Fig. 7), as condições de fluxo de calor no canal do núcleo com maior integral de energia, aproximadamente 40% acima das condições médias do núcleo. A intensidade do fluxo de calor na seção de testes foi decrescente com o tempo, seguindo tanto quanto possível o comportamento da curva de taxa de calor de decaimento, conforme Fig. 8. Durante o teste o circuito operou recirculando água entre o tanque TQ2 e a bomba, com uma vazão total de aspersão mantida constante e igual a $3,5\text{ m}^3/\text{h}$.

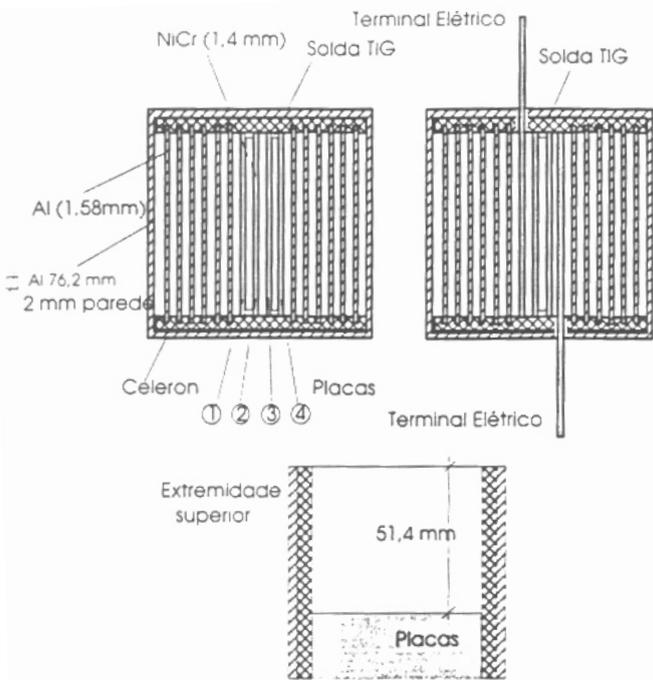


Fig.4 - Seção de Testes STAR

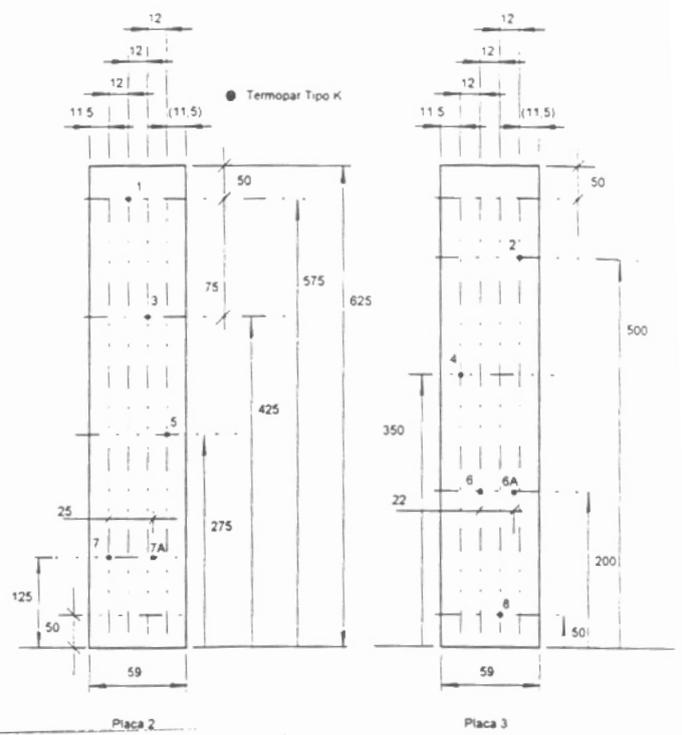


Fig.5 - Posicionamento dos termopares nas placas 2 e 3 da seção de testes STAR

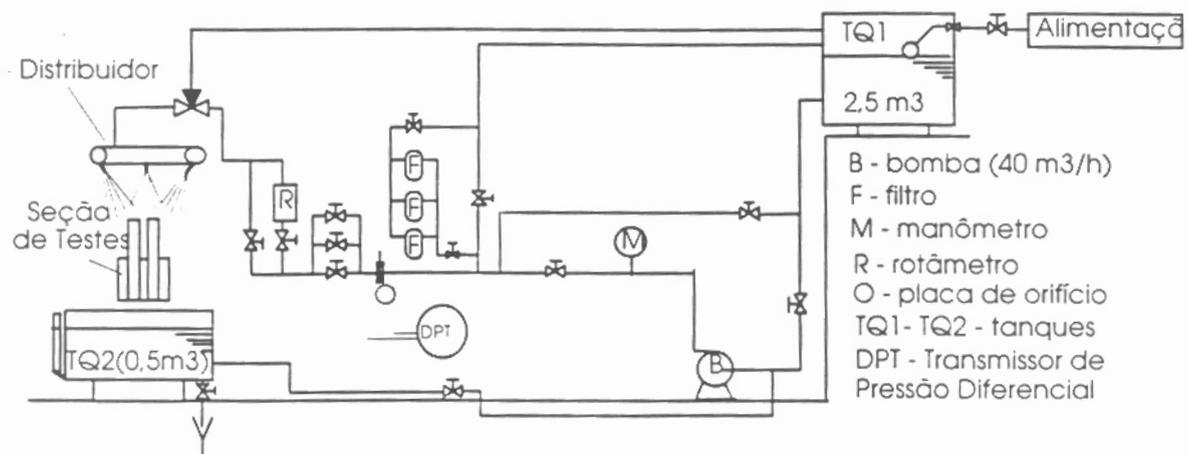


Fig. 6. Circuito Experimental e Seção de Testes

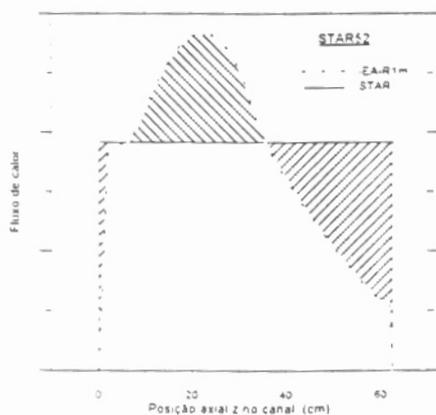


Fig. 7 - Perfil de Fluxo de Calor na Seção de Testes

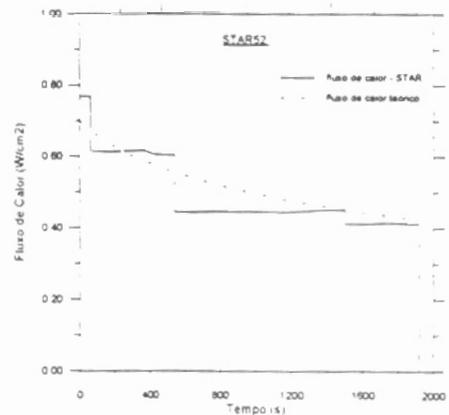


Fig. 8 - Intensidade de Fluxo de Calor na Seção de Testes

RESULTADOS DO TESTE STAR52

Uma das primeiras observações experimentais feitas com o experimento diz respeito ao tipo de escoamento que acontece no canal entre as placas. Os testes iniciais mostraram que o escoamento, principalmente na parte mais central da placa (sentido longitudinal), ocorre na forma de um ou mais filetes de água que escoam ao longo destas, resfriando-as. Este resfriamento se dá principalmente pela evaporação de parte da água dos filetes. Observou-se ainda, que estes filetes não percorrem sempre o mesmo caminho durante o teste. Este tipo de escoamento e seu comportamento peculiar serão importantes na interpretação dos resultados e se deve à pequena quantidade de água, na forma de gotas, que atinge o canal entre as placas. Esta quantidade não é suficiente para preencher o canal e formar um escoamento uniformemente distribuído, e as gotas, devido à tensão superficial tendem a se juntar formando os filetes.

Foi medida a quantidade de água de aspersão recebida pela seção de testes STAR. As medidas foram realizadas de 2 modos: na forma global, ou seja, toda a água que chega à seção de testes, e separadamente nas quatro placas aquecidas centrais. Observou-se que as placas centrais são menos favorecidas na distribuição, pois a água tende a escoar pelas paredes.

O teste STAR52 teve duração aproximada de 32 minutos e os resultados de temperaturas registrados por um Sistema de Aquisição de Dados (SAD) podem ser vistos nas Fig. 9 e 10, que mostram os registros dos termopares nas placas 2 e 3.

As temperaturas máximas observadas foram da ordem de 160°C na placa 2 e 220°C na placa 3. Para combustíveis tipo MTR, admite-se 500°C como limite de temperatura para as placas. Convém lembrar que, as condições de fluxo de calor às quais foram submetidas as placas do experimento referem-se ao canal do núcleo com maior integral de energia a ser dissipada, portanto conservativas. Os resultados mostram que o processo de resfriamento por aspersão é eficiente, e que o distribuidor e a vazão total de aspersão estão adequadamente dimensionados.

Como esperado, as temperaturas registradas pelo termopar T1 foram as mais baixas, isto se deve a sua localização próxima da extremidade superior da seção de testes. Contudo, é possível notar a existência de patamares decrescentes de temperatura provocados pela diminuição da potência na seção de testes. Nesta região a troca de calor se dá pelo aumento da temperatura da água, sem mudança de fase. Em T2, também próximo da extremidade superior, observam-se patamares com temperaturas inferiores a 100°C, indicando também o mesmo tipo de troca de calor. Alguns picos de temperaturas podem ser observados e foram provocados pela utilização dos medidores portáteis de termopares usados para aferir as medidas do SAD. Estes medidores foram instalados em paralelo com SAD e, para registrar manualmente os valores de temperatura eram necessárias operações de chaveamento que provocavam os picos. Devido a problemas durante a aquisição dos dados referentes ao termopar T7A, os mesmos foram registrados manualmente usando o medidor portátil. Por isso as temperaturas de T7A não apresentam oscilações como nos demais termopares.

As Fig. 9 e 10 mostram que, embora os termopares 6 e 6A e 7 e 7A estejam dois a dois na mesma posição axial, eles registram temperaturas bem diferentes durante o transiente. Este

comportamento pode ser explicado com base no tipo de escoamento que ocorre nas placas. As diferenças entre as temperaturas medidas se devem ao posicionamento do(s) filete(s) na placa. Nota-se que, ora um dos termopares registra valores maiores que o outro e ora esse comportamento se inverte, evidenciando a aproximação ou afastamento do(s) filete(s) com relação aos mesmos. Por exemplo, na Fig. 10 entre 150 e 700s as temperaturas registradas por T6A foram superiores às de T6. Porém, a partir de 700s, até aproximadamente 1400s, T6 superou T6A.

Outro ponto que confirma essas mudanças no posicionamento do filete na placa pode ser visto na Fig. 9, onde observam-se quedas bruscas na temperatura T7, enquanto que o termopar adjacente T7A registra temperaturas constantes e próximas a 100°C, temperatura de saturação, durante boa parte do teste. As quedas nas temperaturas são decorrentes da passagem de um filete de água próximo ou sobre o ponto sensível do termopar. Neste caso específico, pode-se concluir que existiam pelo menos dois filetes de água na região desses termopares, com um deles passando muito próximo a T7A.

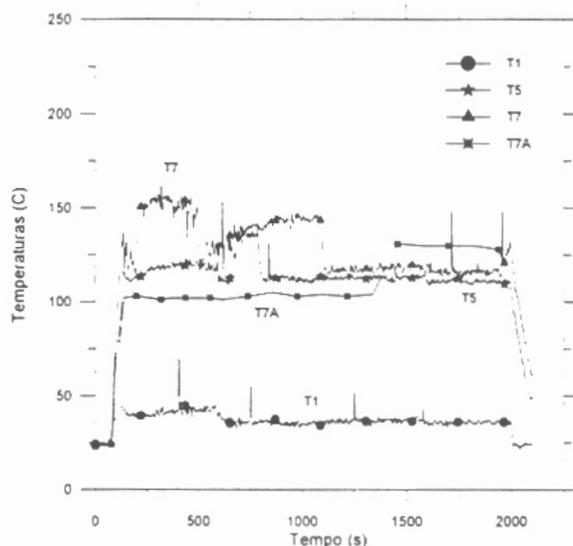


Fig. 9 - Temperaturas na Placa 2

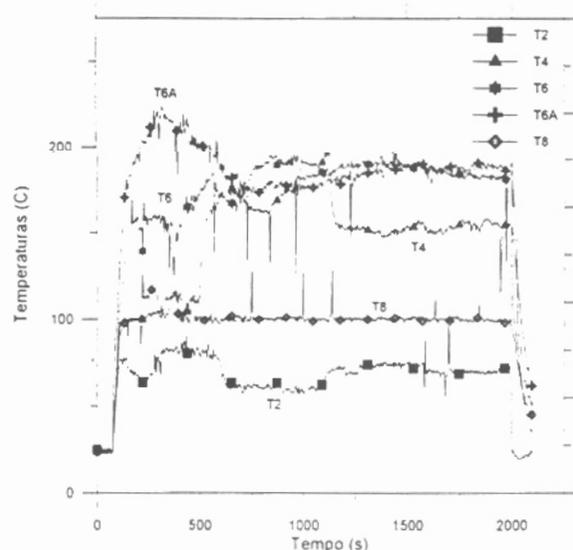


Fig. 10 - Temperaturas na Placa 3

Para analisar o que pode ocorrer nas placas em termos de temperaturas em função do tipo de escoamento observado Fig. (11), e ainda ajudar na compreensão da influência da diferença de materiais entre as placas de combustível que são de alumínio e ligas de alumínio urânio ou óxido de urânio e da seção de testes, modelou-se a seção transversal de uma placa da seção de testes pela equação de energia em duas dimensões conforme Eq. (1). Para resolver numericamente a equação por diferenças finitas foi elaborado um programa em FORTRAN 90.

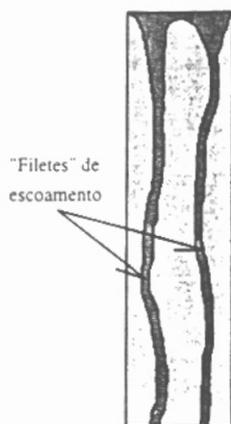


Fig. 11 - Escoamento típico nas placas aquecidas.

Equação de Energia na Placa

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q''' + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

onde ρ é a densidade em $[\text{kg/m}^3]$, c é o calor específico em $[\text{J/kg}^\circ\text{C}]$, q''' é a fonte volumétrica de calor em $[\text{W/m}^3]$ e k é a condutibilidade térmica em $[\text{W/m}^\circ\text{C}]$.

Foi utilizada a discretização mostrada na Fig. 12, com $ii=30$ e $jj = 5$. Para calcular a transferência de calor entre os filetes de água e a placa considerou-se a correlação (Eq. 2) de Thom et al. (1965), e entre a placa e o ar foi adotado um valor constante igual a $7.5 \text{ W/m}^2\text{C}$.

$$T_w - T_{sat} = 22.65 \phi^{0.5} e^{-P_{abs}/87}, \quad (2)$$

onde ϕ é o fluxo de calor em $[\text{MW/m}^2]$, P_{abs} é a pressão absoluta em $[\text{Bar}]$ e T_w e T_{sat} são as temperaturas na superfície da placa e de saturação em $[\text{C}]$.

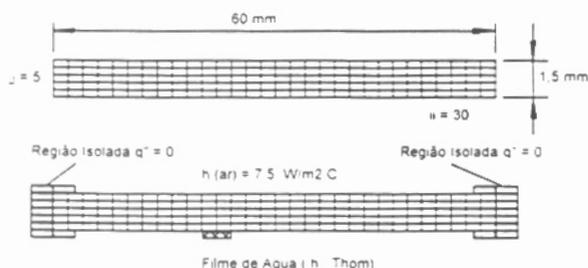


Fig. 12 - Discretização em 2-D da Placa Aquecida.

Verificou-se experimentalmente que nos canais centrais da seção de testes as vazões proporcionadas pelo sistema de aspersão foram sempre superiores a $45 \text{ cm}^3/\text{min}/\text{placa}$, quantidade de água mais do que suficiente para resfriar todo o comprimento aquecido da placa, mesmo na condição mais severa de fluxo de calor uniforme igual ao fluxo de pico de $1,133 \text{ W/cm}^2$. Nessa condição, cálculos indicaram que a máxima evaporação de água é de aproximadamente 30%, o que não afeta significativamente a largura e a espessura do(s) filete(s). Desta forma, pode-se considerar no modelo filete(s) com dimensões constantes sem risco de estar cometendo grandes erros.

A Fig. 13 mostra os resultados da análise de uma condição com um único filete de água com 4 mm de largura posicionado a 22 mm da borda de uma placa aquecida com uma potência de 600 W, equivalente a um fluxo de calor uniforme de $0,8 \text{ W/cm}^2$. Essa condição corresponde a um adicional de 76% com relação a média do núcleo em $t=300\text{s}$. Estão sobrepostos os resultados para a placa de Ni-Cr, cuja condutibilidade térmica é $12 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, e os resultados para a placa de combustível cuja condutibilidade térmica é $144 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Para a placa de Ni-Cr pode-se observar temperaturas superiores a 250°C , enquanto que a mesma condição aplicada a uma placa de combustível de Al/U resultaria em uma temperatura máxima por volta 160°C . Nota-se, também na placa de Ni-Cr, que o termopar T7 estaria medindo uma temperatura igual a 150°C , enquanto seu adjacente T7A acusaria 200°C . Para a placa combustível nas mesmas condições são esperadas temperaturas de 120 e 140°C em T7 e T7A, respectivamente. Comportamento semelhante acontece com os termopares T6 e T6A. Os resultados da modelagem ilustram a influência da posição do filete e do material da placa nos gradientes de temperaturas, e ajudam na compreensão dos resultados do teste STAR52. A Fig. 13 mostra ainda que, se o ponto sensível do termopar estiver na mesma posição do filete, ele registrará temperaturas próximas a 100°C . Isso deve ter ocorrido com os termopares T7A e T8 durante o teste, conforme mostram as Fig. 9 e 10.

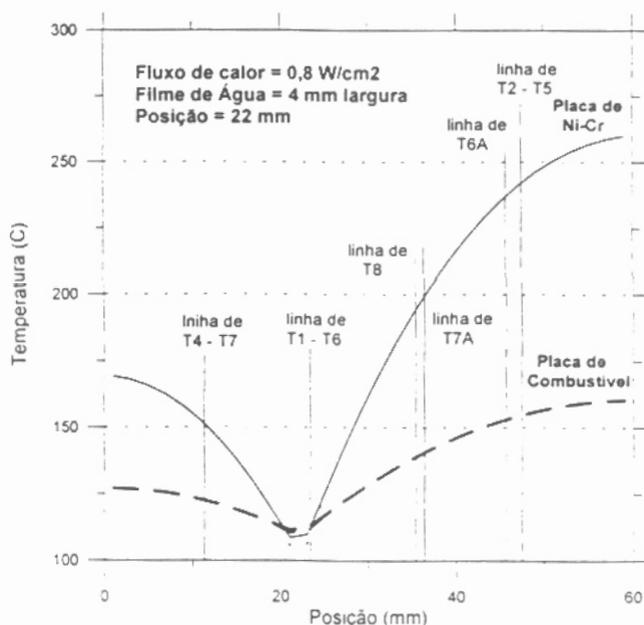


Fig. 13 - Distribuição de temperaturas para $\phi = 0,8 \text{ W/cm}^2$.

A Fig.14 mostra os resultados da análise de uma condição onde o objetivo foi verificar o efeito da multiplicidade de filetes na placa. As condições impostas à placa do modelo foram: fluxo de calor uniforme igual a $1,103 \text{ W/cm}^2$ e dois filetes com 2 mm de largura, posicionados em apenas um dos lados da placa a 27 e 51 mm da borda. Para essas condições foram obtidas temperaturas máximas aproximadas de 500°C para a placa de Ni-Cr e 150°C na placa combustível. Convém lembrar que essa condição de fluxo de calor corresponde a um acréscimo de 143% com relação a média no núcleo em $t=300\text{s}$. A Fig. 14 ilustra também as diferenças nas medidas dos termopares adjacentes. Na placa de NiCr, enquanto T7 estaria medindo 410°C , T7A mediria temperaturas próximas a 200°C . O mesmo comportamento é apresentado por T6 e T6A, porém com valores menores, já que estes estão mais próximos aos filetes.

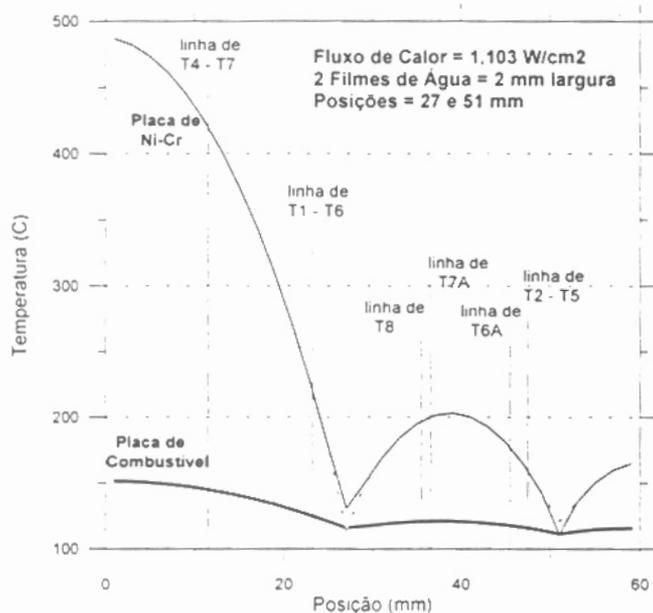


Fig. 14 - Distribuição de temperaturas para $\phi = 1,103 \text{ W/cm}^2$.

CONCLUSÕES

A principal conclusão retirada dos experimentos é que, mesmo para condições de fluxo de calor superestimadas e com material da placa aquecida diferente, o limite de temperatura estabelecido não foi atingido. O material da placa aquecida (liga de NiCr) possui baixa condutibilidade térmica e para que haja condução de calor são necessários elevados gradientes de temperatura, conforme mostram os resultados do modelo numérico. O material das placas combustíveis possui alta condutibilidade térmica quando comparado ao da placa aquecida, de forma que os gradientes de temperatura esperados devem ser bem menores. Isso mostra que a vazão de aspersão e a geometria definida para o distribuidor estão adequadas.

O escoamento da água nas placas ocorre na forma de pequenos filetes sem trajeto fixo. Esse tipo de escoamento é responsável pelo comportamento incomum das temperaturas, observado nos resultados.

REFERÊNCIAS

- Croff, A.G. ORIGEN-2, 1980. "Isotope Generation and Depletion Code". ORNL-TM-7175. Oak Ridge National Laboratory
- Fowler, T.B., Vondy, D.R. and Cunningham, G.W., 1971. "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION". ORNL-TM-2426 Vol.2. Oak Ridge National Laboratory
- Kerr, W., King, J.S., Martin, J.C. and Wehe, D.K., 1991. "The Nuclear Reactor Demonstration Project goes the Evaluation and Analysis of Low Enrichment Fuel - Final Report". Argonne National Laboratory, Argonne. ANL/RERTR/TM-17
- Mapeirian, E., 1997. "Programas LOSS e TEMPLOCA para Análise de Acidentes de Perda de Refrigerante no Reator IEA-R1m" - Relatório Interno IPEN no. PSI.RAS.IPEN.004 - RELT.001.R00
- Parkanski, D., 1992. "Sistema de Refrigeração por Rociado de um Reator Tipo Piscina". Proceedings of IV-CGEN - Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, vol.1
- Thom, J.R.S., Walker, W.M., Fallon, T. A. and Reising, G.F.S., 1965. "Boiling in Subcooled Water during Flow Up Heated Tubes or Annuli". Proc. Inst. Mechanical Engineering 180-226
- Torres, W.M., 1997. "Distribuição de Vazão para definição do Distribuidor do Sistema de Resfriamento de Emergência do Reator IEA-R1m" - Relatório Interno IPEN no. PSI.RES.IEA.R1.002 - RELT.006.R00
- Webster, C.C., 1967. "Water-loss Tests in Water-Cooled and -Moderated Research Reactors". Nuclear Safety, Vol.8, p590-596

ABSTRACT

This work presents the design of an experiment to study the cooling process, by a spray system, of electrically heated plates. The experiment and the test section simulate the conditions that could exist in fuel plates of IEA-R1m research reactor in the case of a loss of coolant accident with total core exposure. A simplified numerical model was developed for the temperature analysis of heated plates. The model solve the energy equation in a plate subjected to similar conditions of cooling provided by the spray system and permits the material influence analysis on temperature gradients.