

AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA PARA DIFERENTES REVESTIMENTOS E COMBUSTÍVEIS

Vinícius Matuck, Isabela A. Cardoso, Rochkhudson B. de Faria, Patrícia A. L. Reis, Claúbia Pereira*, M. A. F. Veloso

Departamento de Engenharia Nuclear – Escola de Engenharia
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627
31270-901 Belo Horizonte, Brasil

Palavras-Chave: Revestimento, Combustível nuclear, RELAP5-3D

RESUMO

Dois tipos de combustíveis e 3 tipos de revestimentos são avaliados considerando seu comportamento térmico. O objetivo é obter a temperatura média dos diferentes componentes da vareta combustível para avaliar posteriormente o comportamento neutrônico. O núcleo de Angra-2 modelado em um trabalho prévio no código de análise termo-hidráulica RELAP5-3D foi usado e as propriedades de transferência de calor dos diferentes materiais foram devidamente modificadas; então o núcleo foi simulado em condições de estado estacionário. Os resultados com os diferentes revestimentos (FeCrAl e SiC HNS) e diferentes combustíveis (UO_2 e U_3Si_2), além de suas respectivas combinações, foram avaliados e comparados com o combustível (UO_2) e revestimento (Zirc4) padrões. As temperaturas médias foram obtidas e serão utilizadas em posteriores trabalhos para análise do projeto neutrônico.

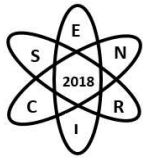
1. INTRODUÇÃO

As ligas metálicas à base de zircônio, dentre elas destaca-se o Zircaloy, são usadas nos reatores nucleares há mais de 50 anos e sempre demonstraram bastante eficiência e segurança nas instalações nucleares. Entretanto, após o terremoto que provocou o tsunami e atingiu Fukushima Daiichi, o Zircaloy passou por um dos maiores testes de segurança desde o início de sua aplicação como revestimento de combustíveis nucleares de sua história. Nesse evento, o Zircaloy apresentou algumas de suas fragilidades, como uma alta e violenta reação exotérmica, devido à falta de refrigeração adequada [1].

Diante da falha do Zircaloy, foi estabelecido um novo desafio, a busca de um revestimento de combustível nuclear capaz de manter sua integridade física, mesmo em condições ainda mais adversas do que as já existentes no núcleo do reator.

A partir de então, diversos centros de pesquisas e universidades de todo o mundo intensificaram suas pesquisas para desenvolver materiais que possam ser substitutos do Zircaloy. Dentre eles, algumas ligas à base de zircônio, como o próprio Zircaloy-4 (Zirc4), Zirlo e Opt Zirlo e a liga à base de ferro, como FeCrAl, que possui melhor resistência à oxidação em relação ao (Zirc4) [2] estão sendo avaliadas. Esta liga metálica é considerada um promissor revestimento de combustível nuclear [3, 4, 5].

Além das ligas metálicas à base de zircônio e do FeCrAl, o material cerâmico denominado SiC (carbeto de silício) reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS), tem demonstrado grande potencial para



ser substituído dos atuais revestimentos de zircaloy empregados nos diversos reatores *Pressurized Water Reactor (PWR)* em operação [6]. Além disso, outras combinações combustível/revestimento também têm sido estudadas e alguns resultados obtidos [7].

A maioria das pesquisas realizadas está associada às propriedades térmicas, físicas e químicas destes materiais. Entretanto, pouco trabalho é encontrado com relação ao comportamento neutrônico.

Neste trabalho, o núcleo do reator de Angra 2 foi simulado em estado estacionário com potência constante, através do código RELAP5-3D [8]. As propriedades de condutividade e capacidade térmicas para diferentes combinações de combustíveis e revestimentos foram avaliadas, com o objetivo de encontrar a temperatura média de trabalho a ser usada nos estudos neutrônicos. Os resultados com os diferentes revestimentos (FeCrAl e SiC HNS) e diferentes combustíveis (UO_2 e U_3Si_2), além de suas respectivas combinações, foram avaliados e comparados com o combustível (UO_2) e revestimento (Zirc4) padrões.

2. METODOLOGIA

2.1 Descrição Geral

Os dados da Usina Nuclear Angra-2, localizada em Angra dos Reis, Rio de Janeiro, disponíveis no FSAR [15] foram usados na modelagem, primeiramente desenvolvida por Mantecón, 2015 [9]. Gerando 1350 MWe, o reator utiliza água leve como refrigerante e moderador, e foi projetado para um circuito de 4 loops.

2.2 Modelagem RELAP5-3D

O núcleo do reator foi modelado usando dez estruturas de calor (representando os 193 elementos combustíveis), cuja potência radial foi distribuída igualmente. Estas estruturas de calor bem como os canais termohidráulicos correspondentes foram divididos (cada um) em 34 volumes axiais, seguindo uma distribuição cosenoidal padrão de potência. A Fig. 1 representa a nodalização do núcleo conforme modelado com 10 canais termo-hidráulicos e 10 estruturas de calor associadas aos mesmos.

A Fig. 2 mostra o modelo para representar as divisões radiais das estruturas de calor. Cada uma das dez barras foi dividida em três regiões, incluindo combustível (3 intervalos), gap (1 intervalo) e revestimento (1 intervalo), totalizando 5 intervalos e 6 meshes.

A Tab. 1 mostra os três tipos diferentes de materiais de revestimento (Zircaloy-4, SiC HNS e FeCrAl) e dois tipos diferentes de combustível (UO_2 e U_3Si_2) que foram considerados neste trabalho.

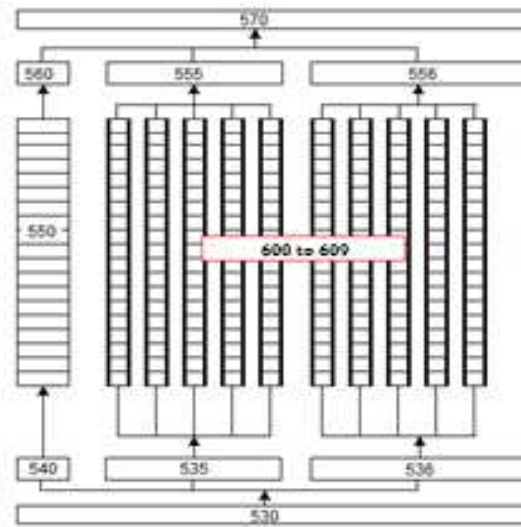


Fig. 1. Nodalização do núcleo do reator.

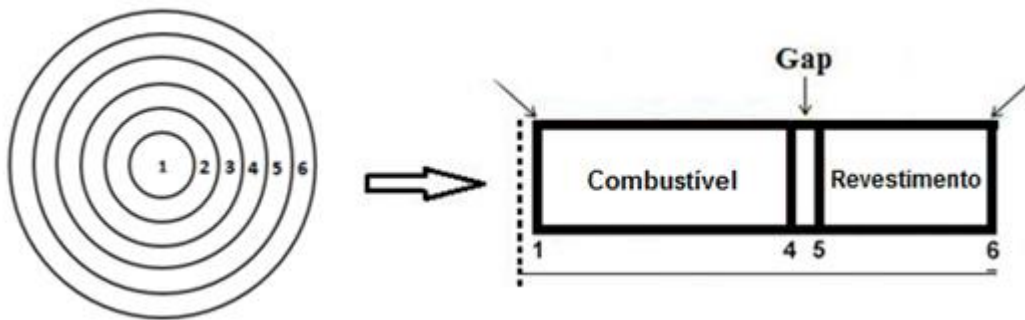
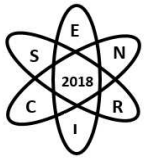


Fig. 2. Divisão radial da estrutura de calor.

Tab. 1. Combinação: combustíveis e revestimentos.

Combustível	Revestimento
UO ₂	Zirc4 SiC HNS FeCrAl
U ₃ Si ₂	Zirc4 SiC HNS FeCrAl

Tratando-se de diferentes combustíveis e revestimentos, as propriedades termofísicas não são equivalentes, portanto, podem influenciar de maneira divergente na transferência de calor do combustível para o revestimento e deste para o moderador/refrigerante. Esta transferência de calor pode afetar de forma significativa a eficiência e segurança de reatores do tipo *Light Water Reactor (LWR)* bem como a temperatura média que realimentará todos os parâmetros neutrônicos.



As propriedades termofísicas para os revestimentos, foram fornecidas por Reis et al. (2015) [10] para o Zircaloy-4, Faria (2017) [6] para o SiC HNS e [11, 14] para o FeCrAl. No caso do combustível U_3Si_2 as propriedades foram retiradas de [12], para verificar possíveis efeitos na temperatura dos combustíveis em função de diferentes tipos de materiais de revestimento.

As Fig. 3 a 6 representam a diferença das propriedades termofísicas dos dois tipos de combustível e dos três tipos de revestimento utilizados. Conseqüentemente, essa situação corroborou para uma diferença significativa nos resultados das temperaturas dos combustíveis em funcionamento normal. Em compensação, a condutividade térmica do FeCrAl e do Zirc4 é bem semelhante, o que justifica uma proximidade entre as suas respectivas temperaturas de operação, que será mostrada na parte dos resultados.

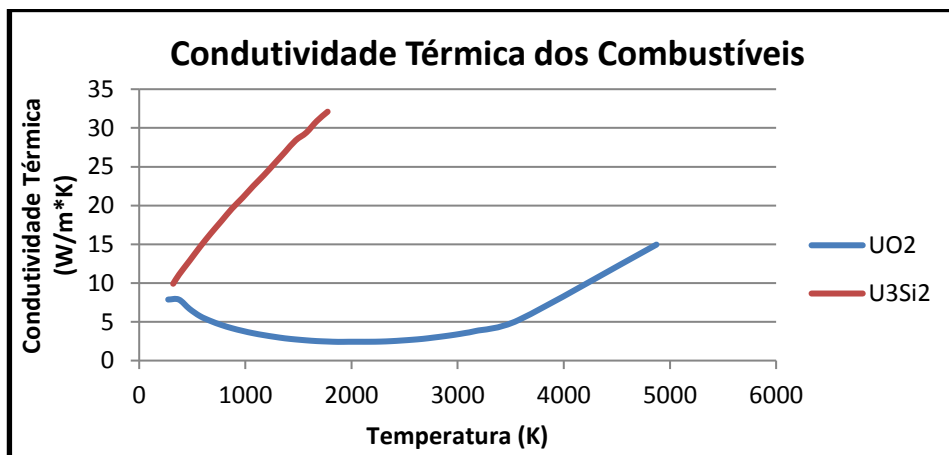


Fig. 3. Condutividade térmica dos combustíveis.

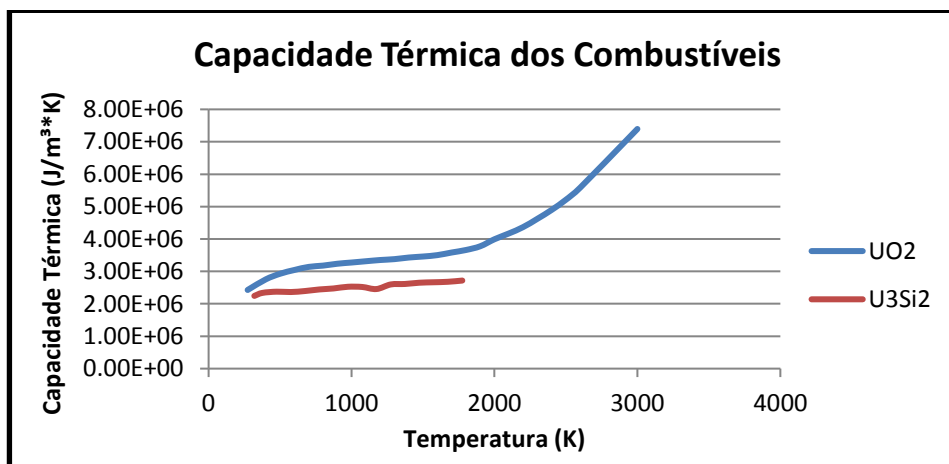


Fig. 4. Capacidade térmica volumétrica dos combustíveis.

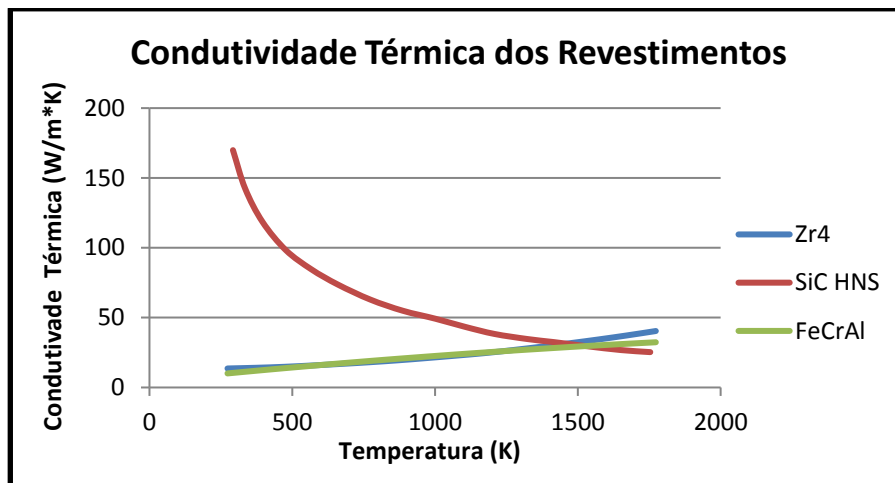
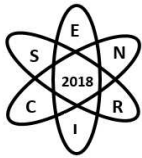


Fig. 5. Condutividade térmica dos revestimentos.

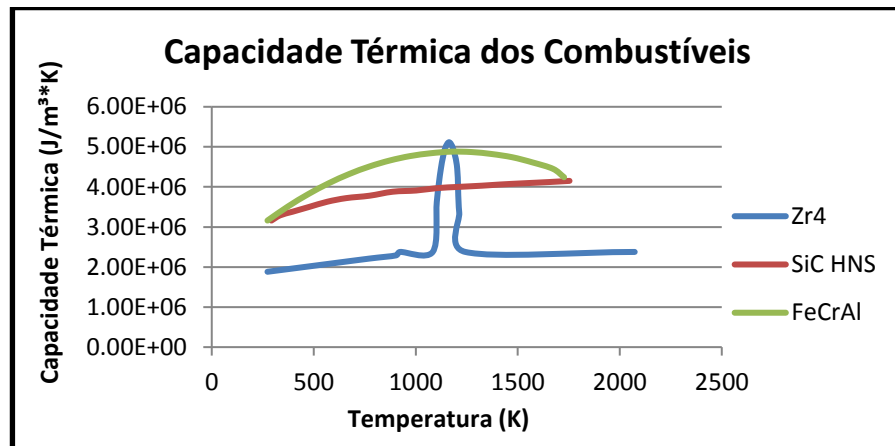


Fig. 6. Capacidade térmica volumétrica dos revestimentos.

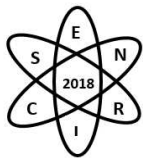
2.3 Cálculos Realizados

O objetivo do trabalho é fazer uma comparação entre os combustíveis e revestimentos baseada na distribuição de temperatura desde a parte central da estrutura de calor e superfície em contato com o refrigerante/moderador, de modo a obter as temperaturas médias em estado estacionário dos dois tipos de combustível e três tipos de revestimentos e suas combinações.

O código RELAP gera em um arquivo de saída as temperaturas para cada volume axial da estrutura de calor. Além disso, têm-se seis temperaturas radiais divididas nos intervalos: combustível, gap e revestimento, como representados na Fig. 2.

A temperatura média será calculada a partir da seguinte relação obtida de [13]:

$$T(\text{médio}) = ((1 - 0,7) * T_{\text{central}} + (0,7 * T_{\text{superficial}})) \quad (1)$$



Dessa maneira, para cada um dos seis casos simulados, obtiveram-se seis temperaturas diferentes para um determinado nível axial. Como o perfil de calor obedece à relação cossenoidal, foi calculada a temperatura média para as divisões axiais de número 2; 9 e 18 de um total de 34 axiais.

3. RESULTADOS

Todos os resultados apresentados são bastante expressivos e evidenciam o comportamento das temperaturas dos combustíveis e revestimentos em determinada estrutura de calor. Em uma primeira análise, os comportamentos apresentados das estruturas de calor se deve às diferenças das propriedades termofísicas de cada material envolvido. As Fig. 5 e 6 apresentam os comportamentos dos combustíveis, UO_2 (padrão) e U_3Si_2 , respectivamente, com os diferentes revestimentos Zirc4 (padrão), FeCrAl e SiC HNS.

A Fig. 5 mostra que o SiC HNS é o material que quando submetido às mesmas condições de operação, trabalha em uma temperatura mais baixa, mostrando que há uma melhor troca de calor do combustível com o revestimento e este com o moderador/refrigerante.

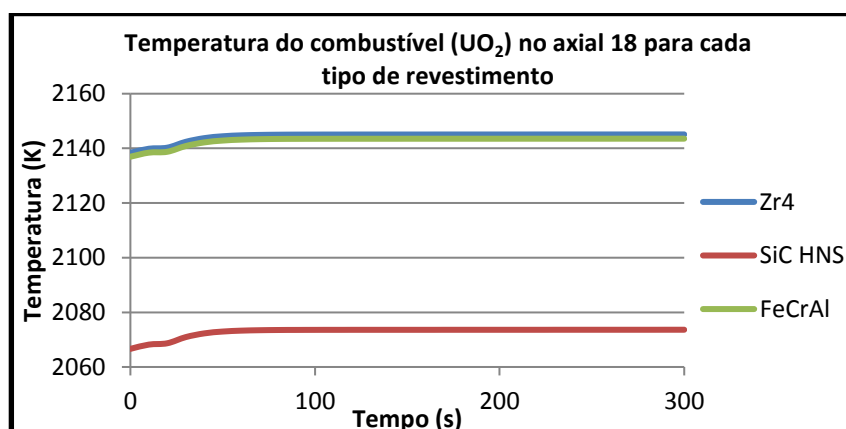


Fig. 5. Temperatura do combustível (UO_2) no axial 18 (mais quente) para cada tipo de revestimento.

A Fig. 6 apresenta o comportamento dos diferentes revestimentos do combustível U_3Si_2 , neste caso, observa-se que a temperatura média durante a operação é também inferior para todos os revestimentos, ou seja, o combustível trabalha em uma temperatura de operação menor. Neste caso também a menor temperatura observada é do revestimento SiC HNS.

Os próximos gráficos a serem apresentados levam em conta o cálculo de temperatura média (apresentado na seção 2.3) para os seis diferentes cenários de combustível e revestimento em 3 axiais diferentes ao longo da vareta de combustível.

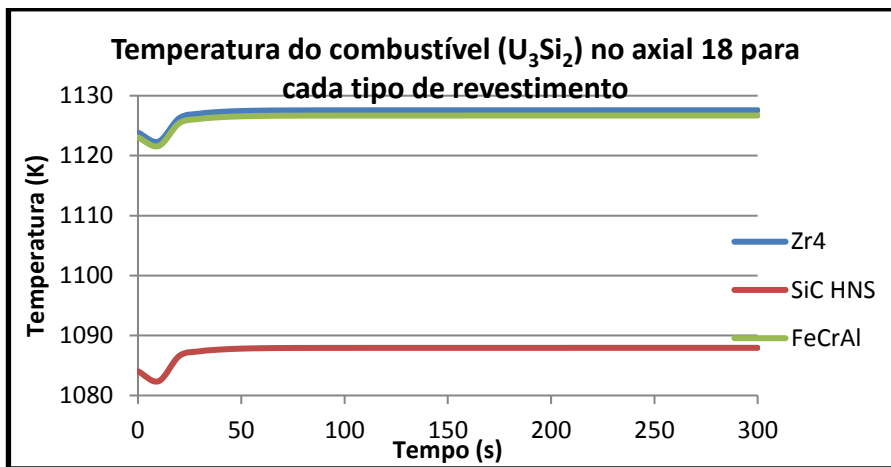
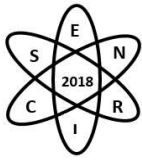


Fig. 6. Temperatura do combustível (U_3Si_2) no axial 18 para cada tipo de revestimento

As Fig. 7, 8 e 9 indicam as temperaturas médias em três axiais diferentes de uma das varetas de combustível presente no núcleo. Dessa maneira é possível concluir que o U_3Si_2 apresentou uma temperatura de operação mais baixa que o combustível convencional UO_2 , devido principalmente às diferenças nas propriedades termofísicas deste. Novamente, o SiC HNS apresentou uma menor temperatura de operação em todas as situações simuladas e a liga FeCrAl teve um desempenho bem semelhante ao do convencional Zircaloy-4, tal fato se deve à similaridade de valores da propriedade condutividade térmica desses dois materiais.

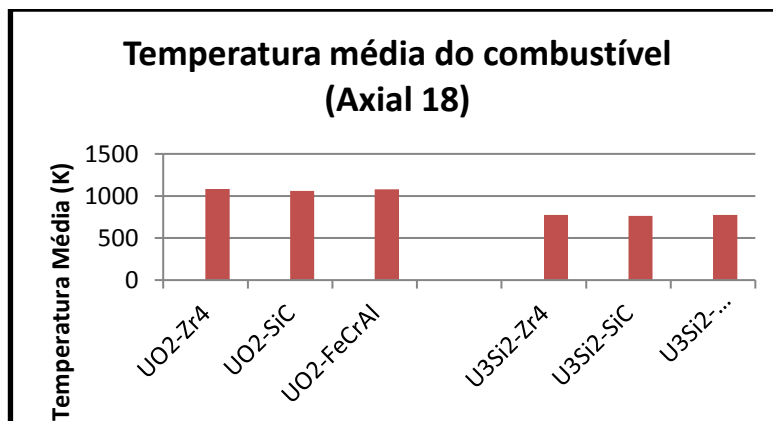


Fig. 7. Temperaturas médias dos combustíveis no axial 18.

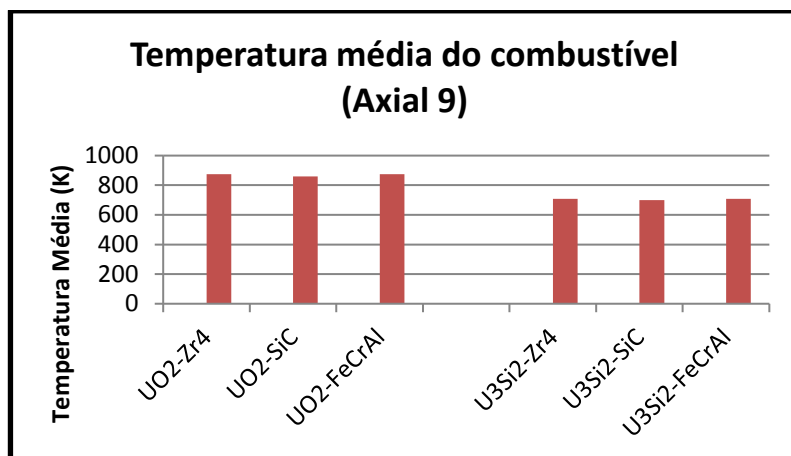


Fig. 8. Temperaturas médias dos combustíveis no axial 9.

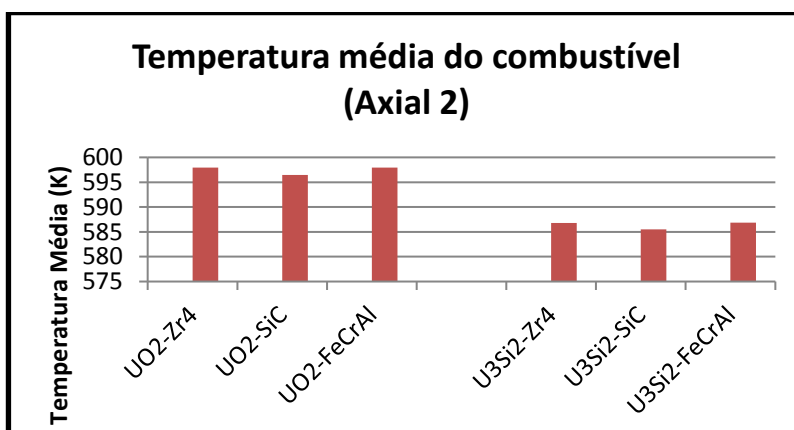


Fig. 9. Temperaturas médias dos combustíveis no axial 2.

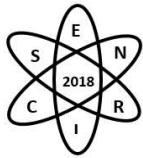
É importante ressaltar que as análises desse trabalho antecedem um estudo da neutrônica dos materiais de revestimento e da nova opção de combustível.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos apontam numa direção bastante promissora, pois, evidenciam a potencialidade do SiC HNS como forte candidato a revestimento do combustível nuclear, não importando se o combustível é o convencional ou U₃Si₂. Entretanto, é importante destacar que a temperatura média de operação à potência constante teve o menor valor em diferentes regiões com a combinação U₃Si₂/SiC HNS, o que é relevante visto que, isto sugere certa possibilidade de o núcleo sofrer uma variação de temperatura do combustível sem afetar os parâmetros de segurança.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que direta ou indiretamente contribuíram para a pesquisa e aos patrocinadores e voluntários doadores pelo apoio à realização deste evento.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. B. de Faria et al., "PWR fuel element neutronic analysis with burnable poison rods using Zircaloy and Hi-Nicalon type S claddings", MRS Proceedings, Vol n. 1814 (2016).
- [2] S. J. Zinkle, K. A. Terrani, J. C. Gehin, L. J. Ott, and L. L. Snead, "Accident tolerant fuels for LWRs: a perspective", Journal of Nuclear Materials, vol. 448, n° 1-3, pp. 374-379, 2014.
- [3] L. J. Ott, K. R. Robb, and D. Wang, "Preliminary assessment of accident-tolerant fuels on LWR performance during normal operation and under DB and BDB accident conditions", Journal of Nuclear Materials, vol. 448, n° 1-3, pp. 520-533, 2014.
- [4] N. M. George, K. Terrani, J. Powers, A. Worrall, and I. Maldonado, "Neutronic analysis of candidate accident-tolerant cladding concepts in pressurized water reactors", Annals of Nuclear Energy, vol. 75, pp. 703-712, 2015.
- [5] X. Wu, T. Koslowski, and J. D. Hales, "Neutronics and fuel performance evaluation of accident tolerant FeCrAl cladding under normal operation conditions", Annals of Nuclear Energy, vol. 85, pp. 763-775, 2015.
- [6] Faria, Rochkhudson Batista de. Carbetto de silício reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S como revestimento de reatores PWR – avaliação neutrônica/Rochkhudson Batista de Faria – 2017. Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia Nuclear.
- [7] Shengli Chen and Cenxi Yuan, "Neutronic Analysis on Potential Accident Tolerant Fuel-Cladding Combination U₃Si₂-FeCrAl. Science and Technology of Nuclear Installations. Vol 2017. Article ID 3146985, 12 pages. Hindawi.
- [8] U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2001, "RELAP5/MOD3.3 Beta Code Manual, Vol. IV – Models and Correlations", Nuclear Safety Analysis Division, NUREG/CR-5535/Rev 1-Vol IV, Washington, DC, 2001.
- [9] Mantecón, Javier González. Modelagem e análise termo hidráulica do reator nuclear angra 2 utilizando o código RELAP5/ Javier González Mantecon – 2015. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia Nuclear.
- [10] Reis, Patricia Amélia et al., "Thermal hydraulic and neutron kinetic simulation of the Angra 2 reactor using a RELAP/PARCS Coupled model, 2015. International Nuclear Atlantic Conference p INAC, 2015, São Paulo, Brazil, October 4-9-2015.
- [11] Kanthal APMT (Tube) Datasheet, "TUBE," 2017. [Online]. Available: <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/tube/kanthal-apmt/>. [Accessed: 14-May-2018].
- [12] J.T. White et al., "Thermophysical properties of U₃Si₂ to 1773 K". Journal of Nuclear Materials 464 (2015) 275–280.
- [13] PARCS v3.0 U.S. NRC "Core Neutronics Simulator USER MANUAL". March, 2010. Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences University of Michigan
- [14] Masayuki MURABAYASHI , Shigenori TANAKA & Yoichi TAKAHASHI (1975) Thermal Conductivity and Heat Capacity of Zircaloy-2, -4 and Unalloyed Zirconium, Journal of Nuclear Science and Technology, 12:10, 661-662
- [15] Eletrobras Termonuclear S.A., "Final Safety Analysis Report - FSAR Angra 2," Eletronuclear, Rio de Janeiro, 2013.