



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES**

**ROCHKHUDSON BATISTA DE FARIA**

**CARBETO DE SILÍCIO REFORÇADO COM FIBRAS DE HI-NICALON TIPO S  
COMO REVESTIMENTO DE REATORES PWR – AVALIAÇÃO NEUTRÔNICA**

**BELO HORIZONTE**

**2017**

**ROCHKHUDSON BATISTA DE FARIA**

**CARBETO DE SILÍCIO REFORÇADO COM FIBRAS DE HI-NICALON TIPO S  
COMO REVESTIMENTO DE REATORES PWR – AVALIAÇÃO NEUTRÔNICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de Concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Pereira Bezerra Lima

BELO HORIZONTE

2017

F224c

Faria, Rochkhudson Batista de.

Carbeto de silício reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S como revestimento de reatores PWR - avaliação neutrônica [manuscrito] / Rochkhudson Batista de Faria. – 2017.

118 f., enc.: il.

Orientadora: Cláudia Pereira Bezerra Lima.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais,  
Escola de Engenharia.

Anexo: f. 118.

Bibliografia: f. 112-117.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Análise por ativação nuclear - Teses.  
3. Reatores de água pressurizada - Teses. 4. Revestimentos - Teses.  
I. Lima, Cláudia Pereira Bezerra. II. Universidade Federal de Minas  
Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.039(043)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**CARBETO DE SILÍCIO (SiC) REFORÇADO COM FIBRAS DE HI-NICALON TIPO S  
COMO REVESTIMENTO DE REATORES PWR - ANÁLISE NEUTRÔNICA**

### ROCHKHUDSON BATISTA DE FARIA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

Aprovada em 23 de fevereiro de 2017, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Cláudia Pereira Bezerra Lima - Orientadora  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Profa. Antonella Lombardi Costa  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Dra. Patrícia Amélia de Lima Reis  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Dra. Maritza Rodríguez Gual  
CDTN/CNEN

Dra. Ana Maria Matildes dos Santos  
CDTN/CNEN

Prof. Clarysson Alberto Mello da Silva  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Belo Horizonte, 23 de fevereiro de 2017.

## **DEDICATÓRIA**

Para minha querida e amada esposa, Cláudia, e minhas lindas filhas, Carolina e Eduarda.

## **AGRADECIMENTOS**

Tenho muito a agradecer e a muitas pessoas. Certamente sem elas não conseguiria vencer e não realizaria mais um sonho na minha vida, mas em especial destaco:

A Javé, que diante das muitas súplicas e lamentações, foi colocando pessoas no meu caminho que me ajudaram durante essa fase profissional da minha vida.

Á Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Cláudia a quem tenho enorme gratidão por ter confiado e me apoiado neste trabalho. E admiração, por estar sempre lutando pelo merecido reconhecimento da qualidade dos trabalhos desenvolvidos no DEN.

Aos colegas e amigos do DEN que sempre me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho e até mesmo fora dele.

Á minha querida e amada família onde aprendi os mais importantes valores da vida.

Às minhas queridas e lindas filhas, Carol e Duda, que apesar de serem crianças, sempre foram compreensivas com minha ausência nas brincadeiras e entenderam as limitações que a elas eram impostas, com a justificativa de que o “papai precisa estudar e trabalhar”.

Jamais poderia deixar de agradecer à minha esposa, Cláudia, pelo amor, generosidade, paciência e sabedoria, por ficar ao meu lado mesmo em momentos de ansiedade, angústia, abatimento, tristeza, silêncio e profundo recolhimento, nunca deixou de acreditar em mim e sempre me agraciou com palavras doces e de incentivo.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

**O conhecimento é capaz de libertar e retirar pessoas da escuridão.**

## RESUMO

Neste estudo, o Carbetto de Silício reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS) (proposto), foi estudado como revestimento de combustível nuclear de um reator PWR, bem como os tubos guias. Os resultados foram comparados com o revestimento Zircaloy (convencional). Do ponto de vista neutrônico o SiC HNS foi analisado no estado estacionário e durante a evolução do combustível. Do ponto de vista térmico, ele foi avaliado quanto à sua transferência de calor no núcleo do reator e em um recipiente de resfriamento após a irradiação.

Para validar a metodologia utilizada, um elemento combustível do benchmark (ECB) foi simulado. Em seguida, o revestimento convencional do combustível foi substituído pelo SiC HNS. Os resultados obtidos mostraram a necessidade de uma avaliação térmica, uma vez que, para os cálculos neutrônicos era necessário o uso de uma temperatura média de trabalho para cada material simulado.

Para avaliar a temperatura média de operação do combustível, do revestimento e do moderador, utilizou-se o código RELAP5. Um modelo simplificado do núcleo do reator da usina de Angra II foi usado no estudo termo-hidráulico que simulou separadamente, o comportamento dos revestimentos (Zircaloy e SiC HNS).

Com os resultados obtidos usando o RELAP5, os revestimentos do ECB foram avaliados sob o aspecto neutrônico. Então, foram consideradas as condições normais de operação, no estado estacionário à *Begin Of Life*, *a Cold Zero Power* e *a Hot Full Power*. Foram analisados e comparados os impactos das varetas de veneno queimável e das variações das temperaturas, nos valores dos fatores de multiplicação e coeficiente de reatividade de temperatura com o uso dos revestimentos, Zircaloy e SiC HNS.

Assim, o estudo foi estendido e a mesma metodologia foi aplicada ao núcleo do reator de Angra II, onde foram avaliadas as variações nas composições de boro e veneno queimável, além da razão de conversão (C) durante a evolução do combustível. As análises neutrônicas foram feitas usando o sistema de código *SCALE 6.0* (*Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation*).

Finalmente, uma vareta de combustível do ECB após a sua queima total, foi analisada via código computacional *ANSYS*, em termos da transferência de calor, do combustível para os revestimentos, Zircaloy e SiC HNS, e dos revestimentos para a água de refrigeração após a irradiação.

Palavras-chave: PWR, revestimento e Hi-Nicalon tipo S

## **ABSTRACT**

In this study, Silicon Carbide reinforced with Hi-Nicalon type S fibers (SiC HNS) (proposed), was simulated as a nuclear fuel cladding of a PWR reactor, as well as the guide tubes. The results were compared with the Zircaloy cladding (conventional). From the neutron point of view, the SiC HNS was analyzed in the steady state and during the evolution of the fuel. From a thermal point of view, it was evaluated for its heat transfer in the core of the reactor and in a cooling vessel after irradiation.

To validate the methodology used, a benchmark fuel element (ECB) was simulated. Thereafter, the conventional cladding of the fuel was replaced by the SiC HNS. The results showed the need for a thermal evaluation, since, for the neutronic calculations, it was necessary to use a mean operation temperature for each simulated material.

In order to evaluate the average temperature of operation of the fuel, the cladding and the moderator, the code RELAP5 was used. A simplified reactor core model of the Angra II plant was used in the thermo-hydraulic study that simulated separately the behavior of the coatings (Zircaloy and SiC HNS).

Thus, the study was extended and the same methodology was applied to the reactor core of Angra II, where variations in boron and burnable poison compositions were evaluated, as well as the conversion ratio (C) during the evolution of the fuel. Neutronic analyzes were performed using the SCALE 6.0 system (Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation).

Finally, an ECB fuel rod after its total burn was analyzed via ANSYS computational code in terms of heat transfer, fuel for the claddings, Zircaloy and SiC HNS, and the claddings for the cooling water after irradiation.

**Keywords:** PWR, cladding and Hi-Nicalon type S



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Funções, propriedades e aplicações de novos cerâmicos. Extraída e adaptada do Escritório de Cerâmicas finas, do Ministério do Comércio Internacional e da Indústria, Tóquio. (Ohring, 1995).....	28
<b>Figura 2.</b> Célula unitária para a estrutura cristalina da esfalerita (SiC). Adaptada de (Callister, 2007). .....	29
<b>Figura 3.</b> Estrutura cristalina nas fases (a) alfa-SiC e (b) beta-SiC (Snead et al., 2007) .....	30
<b>Figura 4.</b> Tubos de revestimentos de carbetto de silício (a) monolítico, (b) duplex (CANES), (c) tríplex (Hallstadius et al. 2012) e (d) multicamadas (CANES).....	32
<b>Figura 5.</b> (a) Célula do combustível e (b) Célula do tubo guia. ....	42
<b>Figura 6.</b> Pastilhas, varetas, esqueleto e elemento combustível (INB, 2013).....	42
<b>Figura 7.</b> Geometria do elemento combustível com 24 tubos guias e um tubo guia central. ....	43
<b>Figura 8.</b> Fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) para os dois revestimentos ao longo da queima.....	49
<b>Figura 9.</b> Razão entre o fluxo térmico e fluxo total no combustível e nos revestimentos .....	50
<b>Figura 10.</b> Vareta combustível de Angra II modelado no RELAP5 (medidas fora de escala) .....	52
<b>Figura 11.</b> (a) Temperatura radial a meia altura do EC para os dois revestimentos, (b) e (c) temperaturas radiais em diferentes pontos.....	55
<b>Figura 12.</b> As temperaturas radiais em diferentes pontos do combustível do núcleo à meia altura. ....	55
<b>Figura 13.</b> Comparação da temperatura do EC em uma distribuição axial localizada no centro do núcleo do reator. ....	56
<b>Figura 14.</b> Região de pico de temperatura no EC em uma distribuição axial localizada no centro do núcleo do reator. ....	56
<b>Figura 15.</b> Elemento combustível com 8 varetas de veneno queimável.....	59
<b>Figura 16.</b> Elemento combustível com 12 varetas de veneno queimável.....	59
<b>Figura 17.</b> Fator de multiplicação infinito no estado estacionário em BOL com variações de temperaturas, dois tipos de revestimentos e sem varetas de veneno queimável (SVVQ). ....	64
<b>Figura 18.</b> Fator de multiplicação infinito com variações de temperatura no estado estacionário em BOL com os dois revestimentos e uso de 8 varetas de veneno queimável (8 VVQ). ....	65
<b>Figura 19.</b> Fator de multiplicação infinito com variações de temperatura no estado estacionário em BOL com os dois revestimentos e uso de 12 varetas de veneno queimável (12 VVQ). ....	65
<b>Figura 20.</b> Seção de choque microscópica de absorção de nêutrons do Zircaloy e do SiC HNS, através da biblioteca neutrônica ENDF 7.1. ....	66

<b>Figura 21.</b> Seção de choque microscópica total de nêutrons do Zircaloy e SiC HNS, através da biblioteca neutrônica ENDF 7.1. ....	67
<b>Figura 22.</b> (a) Fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) durante a queima usando o SiC HNS e o Zircaloy sem varetas de veneno queimável (SVVQ), nas respectivas temperaturas médias padrões do combustível 840 K e 873 K; (b) e (c) apresenta o comportamento em intervalos menores de queima. ....	69
<b>Figura 23.</b> Fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) durante a queima usando o SiC HNS e o Zircaloy, ambos com 8 varetas de veneno queimável (8 VVQ) e as respectivas temperaturas médias padrões do combustível 840 K e 873 K. ....	70
<b>Figura 24.</b> Valores de $k_{inf}$ durante a queima usando o SiC HNS e o Zircaloy, ambos com 12 varetas de veneno queimável (12 VVQ) e as respectivas temperaturas médias padrões do combustível 840 K e 873 K. ....	71
<b>Figura 25.</b> Valores de $\alpha_{combustível}$ com o uso dos revestimentos SiC HNS e Zircaloy, sem varetas de veneno queimável, com variações de temperaturas de 50 K em relação às respectivas temperaturas de médias de operação 840 K e 873 K. ....	72
<b>Figura 26.</b> Valores do $\alpha_{combustível}$ com o uso dos revestimentos SiC HNS e Zircaloy, com 8 varetas de veneno queimável, com variações de temperaturas de 50 K em relação às respectivas temperaturas de médias de operação 840K e 873K. ....	73
<b>Figura 27.</b> Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível com o uso dos revestimentos SiC HNS e Zircaloy, 12 varetas de veneno queimável, com variações de temperaturas de 50 K em relação às respectivas temperaturas de médias de operação 840 K e 873 K. ....	74
<b>Figura 28.</b> Célula do combustível do núcleo do reator de Angra II. Medidas fora de escala. ....	76
<b>Figura 29.</b> Comparação do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) da célula de combustível com diferentes enriquecimentos usando os dois revestimentos, através do módulo <i>TRITON-KENO VI</i> . ....	84
<b>Figura 30.</b> Comparação do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) da célula de combustível com diferentes enriquecimentos usando os dois revestimentos, através do módulo <i>TRITON-NEWT</i> . ....	84
<b>Figura 31.</b> Elemento combustível com varetas de $UO_2$ , 20 tubos guia e 8 varetas de $UO_2 + Gd_2O_3$ . ....	86
<b>Figura 32.</b> Elemento combustível com varetas de $UO_2$ , 20 tubos guia e 12 varetas de $UO_2 + Gd_2O_3$ . ....	86
<b>Figura 33.</b> Elementos combustíveis com enriquecimentos (a) 1,9%, (b) 2,5%, (c) 3,2% e cada um com 20 tubos guias. ....	87
<b>Figura 34.</b> Núcleo do reator de Angra II. ....	87
<b>Figura 35.</b> Fator de multiplicação efetivo ( $k_{eff}$ ) com os dois revestimentos em função do boro inserido. ....	89
<b>Figura 36.</b> Fator de multiplicação efetivo ( $k_{eff}$ ) com variações de temperatura no estado estacionário em BOL com os dois revestimentos. ....	92
<b>Figura 37.</b> Valor do $k_{eff}$ do núcleo durante a queima sem boro, com veneno queimável e os revestimentos, Zircaloy (convencional) e SiC HNS (proposto). ....	95

<b>Figura 38.</b> Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível do núcleo com os dois revestimentos, com 500 ppm de boro e veneno queimável.....	95
<b>Figura 39.</b> Valor do $k_{\text{eff}}$ do núcleo durante a queima com 500 ppm de boro, com veneno queimável e com os revestimentos, Zircaloy e SiC HNS. ....	96
<b>Figura 40.</b> Valores do $k_{\text{eff}}$ nos dois revestimentos sem e com 500 ppm de boro.....	97
<b>Figura 41.</b> Comparação dos valores de $k_{\text{eff}}$ nos dois revestimentos sem e com boro..	98
<b>Figura 42.</b> Valores da massa de Gd-155 e Gd-157 em função do tempo para os dois revestimentos. ....	99
<b>Figura 43.</b> Comparação do $k_{\text{eff}}$ com os dois revestimentos em função do Gd-155 e Gd-157. ....	101
<b>Figura 44.</b> Razão de conversão para o núcleo do reator de Angra II considerando $^{235}\text{U}$ e $^{239}\text{Pu}$ . ....	102
<b>Figura 45.</b> Vista da vareta de combustível imerso em água. De dentro para fora: combustível (cor verde), revestimento (camada intermediária) e água, respectivamente. A figura está fora de escala.....	104
<b>Figura 46.</b> Vista em corte da geometria da célula combustível do benchmark e da malha utilizada. Do centro para a extremidade: combustível, revestimento e água. ..	104
<b>Figura 47.</b> Comportamento temporal das temperaturas médias (a) do combustível, (b) do revestimento e (c) da água com o uso dos revestimentos, Zircaloy e SiC HNS....	109

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Revestimentos à base de zircônio (Hallstadius et al., 2012).....	27
<b>Tabela 2.</b> Calor específico em função da temperatura.....	34
<b>Tabela 3.</b> Algumas propriedades físicas de compósitos com fibras à base de SiC.....	36
<b>Tabela 4.</b> Parâmetros do elemento combustível modelado e simulado (OECD, 2006) .....	43
<b>Tabela 5.</b> Composição dos materiais modelados e simulados (OECD, 2006) .....	44
<b>Tabela 6.</b> Comparação dos valores do $k_{inf}$ de vários países, códigos e bibliotecas neutrônicas (Faria et al., 2015) .....	46
<b>Tabela 7.</b> Composição do novo revestimento (SiC HNS) .....	47
<b>Tabela 8.</b> Comparação dos valores do $k_{inf}$ para os dois revestimentos com várias bibliotecas .....	48
<b>Tabela 9.</b> Características térmicas do SiC HNS (Rashed, 2002). .....	53
<b>Tabela 10.</b> Zircaloy sem varetas de veneno queimável .....	61
<b>Tabela 11.</b> SiC HNS sem varetas de veneno queimável.....	62
<b>Tabela 12.</b> Zircaloy com 8 varetas de veneno queimável.....	62
<b>Tabela 13.</b> Zircaloy com 12 varetas de veneno queimável.....	63
<b>Tabela 14.</b> SiC HNS com 8 varetas de veneno queimável .....	63
<b>Tabela 15.</b> SiC HNS com 12 varetas de veneno queimável .....	64
<b>Tabela 16.</b> Parâmetros para evolução do combustível (OECD, 2006) .....	68
<b>Tabela 17.</b> Combustível enriquecido a 1,9% revestido com Zircaloy .....	78
<b>Tabela 18.</b> Combustível enriquecido a 2,5% revestido com Zircaloy .....	78
<b>Tabela 19.</b> Combustível enriquecido a 3,2% revestido com Zircaloy .....	79
<b>Tabela 20.</b> Combustível enriquecido a 3,5% revestido com Zircaloy .....	79
<b>Tabela 21.</b> Combustível enriquecido a 1,9% revestido com SiC HNS.....	80
<b>Tabela 22.</b> Combustível enriquecido a 2,5% revestido com SiC HNS.....	80
<b>Tabela 23.</b> Combustível enriquecido a 3,2% revestido com SiC HNS.....	81
<b>Tabela 24.</b> Combustível enriquecido a 3,5% revestido com SiC HNS.....	81
<b>Tabela 25.</b> Valores do $k_{inf}$ com o Zircaloy usando os módulos <i>TRITON (KENO VI e NEWT)</i> .....	83
<b>Tabela 26.</b> Valores do $k_{inf}$ com SiC HNS usando os módulos <i>TRITON (KENO VI e NEWT)</i> .....	83
<b>Tabela 27.</b> Parâmetros necessários na modelagem e simulação do núcleo do reator de Angra II.....	88
<b>Tabela 28.</b> Valores do $k_{eff}$ e $\alpha_{combustível}$ do núcleo do reator de Angra II com o Zircaloy. .....	90
<b>Tabela 29.</b> Valores do $k_{eff}$ e $\alpha_{combustível}$ do núcleo do reator de Angra II com o SiC HNS. ....	91
<b>Tabela 30.</b> Valores do $k_{eff}$ e $\alpha_{combustível}$ do núcleo do reator de Angra II com variações na temperatura do combustível.....	92
<b>Tabela 31.</b> Comparação da variação do B no núcleo com os dois revestimentos durante a queima.....	99

<b>Tabela 32.</b> Comparação da variação de Gd no núcleo com os dois revestimentos durante a queima.....	100
<b>Tabela 33.</b> Parâmetros para a simulação da vareta de combustível do ECB depois de irradiada .....	105
<b>Tabela 34.</b> Comparações de alguns parâmetros do Zircaloy e SiC HNS .....	110

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANSYS – *Analysis System*  
BOL – *Begin Of Life*  
BWR – *Boiling Water Reactor*  
CANES – *Center of Advanced Nuclear Energy Systems*  
CEA - *Commissariat à l'Énergie Atomique*  
CNEN – *Comissão Nacional de Energia Nuclear*  
CFR – *Code of Federal Regulations*  
CFX – *Computational Fluid Software*  
Comb. - *Combustível*  
CMC – *Ceramic Matrix Composite*  
CSAS – *Criticality Safety Analysis Sequence*  
CVD – *Chemical Vapor Deposition*  
CVI – *Chemical Vapor Infiltration*  
CZP – *Cold Zero Power*  
DEN – *Departamento de Engenharia Nuclear*  
DP – *Desvio Padrão*  
DPR – *Desvio Padrão Relativo*  
ECB – *Elemento Combustível Benchmark*  
EUA – *Estados Unidos da América*  
FP – *Full Power*  
FSAR – *Final Safety Analysis Report*  
GPa – *Gigapascal*  
GWd – *Gigawatt dia*  
HFP – *Hot Full Power*  
IAEA - *International Atomic Energy Agency*  
INB – *Indústrias Nucleares do Brasil*  
INEL – *Idaho National Engineering*  
JAERI - *Japan Atomic Energy Research Institute*  
JENDL – *Dados de Biblioteca*  
JNES - *Japan Nuclear Energy Safety Organisation*  
KENO: *Monte Carlo transport code*  
LOCA – *Loss Of Coolant Accident*  
LOFT – *Loss Fluid Test*  
LWR – *Light Water Reactor*  
MeV – *Megaelétronvolt*  
MWd – *Megawatt dia*  
MWe – *Megawatt elétrico*  
MIT – *Massachusetts Institute of Technology*  
Mod. – *Moderador*  
MTU – *Tonelada Métrica de Urânio*  
NRC – *Nuclear Regulatory Commission*

OECD – *Organisation for Economic Co-Operation and Development*  
ORNL - *Oak Ridge National Laboratory*  
PSI - *Paul Scherrer Institute*  
PWR – *Pressurized Water Reactor*  
PZ – **P**otência **Z**ero  
QPZ – **Q**uente e **P**otência **Z**ero  
REBZr – Elemento *Benchmark* com revestimento de **Zircaloy**  
REBSiC – Elemento *Benchmark* com revestimento de **SiC** reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S  
RELAP: *Reactor Excursion and Leak Analysis Program*  
Rev. - **R**evestimento  
SCALE - *Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*  
SERCO – *Institute United Kingdom*  
SiC – **C**arbeta de **S**ilício  
SiC<sub>f</sub> – *Silicon Carbide fiber*  
SiC<sub>m</sub> – *Silicon Carbide matrix*  
SVVQ – **S**em **V**aretas de **V**eneno **Q**ueimável  
UFMG – **U**niversidade **F**ederal de **M**inas **G**erais  
VVQ – **V**areta de **V**eneno **Q**ueimável  
VTT - *Technical Research Centre of Finland*  
WNA – *World Nuclear Association*  
ZP – **Z**ero **P**ower

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$ : Difusividade

$\alpha_{\text{combustível}}$ : Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível

$\beta^-$ : Partícula beta menos (elétron)

$\gamma$ : Radiação gama

$c_p$ : Calor específico

$C_p$ : Capacidade calorífica ou Capacidade térmica

$\Delta T$ : Variação de Temperatura

$\Delta k$ : Variação do fator de multiplicação

$k_c$ : Condutividade térmica

$k_{\text{inf}}$ : fator de multiplicação infinito

$k_{\text{eff}}$ : fator de multiplicação efetivo

$\rho$ : Densidade

$\Sigma$ : Somatório

$\sigma$ : Desvio Padrão do código



## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1. JUSTIFICATIVA E OBJETIVO .....	20
1.2. ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	21
<b>CAPÍTULO 2. REVESTIMENTOS .....</b>	<b>24</b>
2.1. ZIRCALOY .....	24
2.2. CARBETO DE SILÍCIO (SiC) .....	28
<b>CAPÍTULO 3. CÓDIGOS UTILIZADOS .....</b>	<b>37</b>
3.1. CSAS.....	38
3.2. TRITON (KENO VI E NEWT) .....	38
3.3. RELAP5 .....	39
3.4. ANSYS .....	40
<b>CAPÍTULO 4. VALIDAÇÃO DO MODELO DO ECB E APLICAÇÃO DO NOVO REVESTIMENTO.....</b>	<b>41</b>
4.1. DESCRIÇÃO DO <i>BENCHMARK</i> .....	41
4.2. MODELAGEM DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL DO <i>BENCHMARK</i> (ECB) .....	44
4.3. RESULTADO DA VALIDAÇÃO DO ECB .....	45
4.4. SUBSTITUIÇÃO DO REVESTIMENTO DO ECB .....	47
4.4.1. <i>Resultado: cálculo de criticalidade do ECB com o novo revestimento em estado estacionário</i> .....	48
4.4.2. <i>Resultado: ECB com os dois revestimentos durante evolução do combustível.</i>	49
4.5. MODELAGEM DA VARETA DE COMBUSTÍVEL DO NÚCLEO DO REATOR DE ANGRA II	51
4.5.1. <i>Comparação da temperatura da vareta combustível do núcleo do reator de Angra II com os dois revestimentos</i> .....	54
4.6. ANÁLISES DO ECB SEM E COM VARIAÇÕES DE VARETAS DE VENENO QUEIMÁVEL E COM OS DOIS REVESTIMENTOS .....	58
4.6.1. <i>ECB com os dois revestimentos no estado estacionário em BOL</i> .....	58
4.6.2. <i>Resultados</i> .....	60
4.6.3. <i>ECB com os dois revestimentos durante a evolução do combustível</i> .....	67

4.6.4. Resultados.....	68
<b>CAPÍTULO 5. APLICAÇÃO AO REATOR DE ANGRA II.....</b>	<b>75</b>
5.1. CÁLCULO DE CÉLULA .....	75
5.1.1. <i>Variações de boro e enriquecimentos no estado estacionário à BOL.....</i>	77
5.1.2. Resultados.....	77
5.1.3. <i>Evolução do combustível .....</i>	82
5.1.4. Resultados.....	82
5.2. NÚCLEO DO REATOR DE ANGRA II .....	85
5.2.1. <i>Estado estacionário à Begin Of Life (BOL) .....</i>	88
5.2.2. Resultados.....	89
5.2.3. <i>Evolução do combustível .....</i>	93
5.2.4. Resultados.....	94
<b>CAPÍTULO 6. ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE DECAIMENTO DE UMA VARETA COMBUSTÍVEL APÓS IRRADIAÇÃO.....</b>	<b>103</b>
6.1. SIMULAÇÃO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL VIA CÓDIGO ANSYS .....	103
6.1.2. <i>Condições iniciais, propriedades físicas dos materiais e fonte de calor .....</i>	105
6.1.3. <i>Resultado da análise da vareta de combustível.....</i>	107
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>111</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO: LISTA DOS TRABALHOS PUBLICADOS .....</b>	<b>119</b>

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Existem mais de 440 reatores nucleares comerciais operáveis em 31 países, com mais de 390.000 MWe de capacidade total e cerca de 60 reatores estão em construção. Eles fornecem mais de 11% da eletricidade do mundo como energia contínua e sem emissões significativas de dióxido de carbono, conforme relatório atualizado em janeiro de 2107, por World Nuclear Association, (WNA, 2017).

Todas as partes do mundo estão envolvidas no desenvolvimento da energia nuclear, por enxergar nesta fonte uma forma de energia segura e praticamente inesgotável. Alguns países como Finlândia e França estão expandindo seus parques de usinas nucleares e vários outros da Europa Oriental (Bulgária, República Checa, Hungria, Romênia, Eslováquia, Eslovênia e Turquia) estão com firmes planos para a construção de novas usinas de energia nuclear. A Rússia planeja aumentar sua capacidade nuclear para 30,5 GWe até 2020, além construir e financiar novas usinas nucleares em vários países. A Coreia do Sul tem planos de colocar 12 novos reatores para geração de energia, além do intenso envolvimento em pesquisas em projetos inovadores de reatores nucleares, conforme relatório atualizado em janeiro de 2107, por World Nuclear Association, (WNA, 2017).

Além de plantas nucleares comerciais, existem cerca de 245 reatores de pesquisa que operam em 55 países. Estes têm muitos usos, incluindo a investigação e a produção de isótopos para aplicações à medicina e à indústria conforme relatório atualizado em janeiro de 2107, por World Nuclear Association, (WNA, 2017).

Diante desse cenário de franca expansão da transformação da energia a partir de fonte nuclear e do elevado aumento da necessidade da energia elétrica com a responsabilidade de geração com menor impacto ambiental possível, é fundamental o desenvolvimento de novos materiais que sejam capazes de suportar elevadas taxas de radiação e temperatura, como os núcleos dos reatores nucleares. Este ambiente adverso é capaz de alterar as propriedades dos materiais, como por exemplo, metais poderão tornar-se frágeis, inchar, aumentar a taxa de corrosão, etc., e tudo isso pode comprometer a segurança das instalações nucleares e conseqüentemente, do público.

A corrida pela busca de novos materiais capazes de serem empregados nas usinas nucleares de forma segura sempre foi um desafio para os pesquisadores. Quando foi percebido que o aço inoxidável empregado nos reatores a água fervente (*Boiling Water Reactor-BWR*) ficavam fragilizados na presença de oxigênio dissolvido, a solução foi buscar um material que pudesse substituir esses revestimentos, o que vem ocorrendo desde os anos de 1960, quando os revestimentos de aço inoxidável dos reatores água leve (*LWR*) começando pelos reatores *BWR* foram substituídos pelo Zircaloy (Thomaz, 1974).

Embora o Zircaloy possua inúmeras vantagens sobre o aço inoxidável e seja uma tecnologia reconhecida mundialmente, além de ser uma liga em que tem progredido constantemente com o objetivo de tornar as falhas cada vez mais raras (Glasstone & Sesonske, 1981, IAEA, 2007, Simnad, 1981), a falta de refrigeração adequada dos elementos combustíveis irradiados em decorrência do acidente ocorrido no Japão em 2011, evidenciaram algumas de suas fragilidades, como a violenta reação com o hidrogênio provocando assim explosões (Stempien et al., 2013 e Dobisesky, 2011). Mesmo sabendo que vários reatores PWR tem revestimentos à base de liga de zircônio mais avançada como o M5 e o ZIRLO, a maior experiência existente com revestimentos de combustíveis nucleares são com o Zircaloy-4 (Stempien et al., 2013).

### **1.1. Justificativa e Objetivo**

Assim, novamente os pesquisadores se viram desafiados a encontrar material capaz de substituir de forma eficiente os atuais revestimentos dos combustíveis nucleares, quando em março de 2011, o mundo foi surpreendido pelas notícias do grande abalo sísmico ocorrido no Japão que provocou o tsunami com ondas gigantes que atingiram a central nuclear de Fukushima Daiichi, produzindo danos ao sistema de refrigeração dos reatores, comprometendo assim a segurança de toda a planta.

As combinações Zircaloy, vapor com alta temperatura e refrigeração inadequada, provocam altíssimas reações exotérmicas de oxidação do Zircaloy (Stempien et al., 2013 e Dobisesky, 2011). Então, esse evento, acelerou o estudo de materiais cerâmicos, como o carbeto de silício (SiC), que pode ser um monolítico, ou um compósito, reforçado com fibras duplex, triplex ou multicamada (CANES, 2016 e

Hallstadius et al., 2012), que dentre outras vantagens, tem boa condutividade térmica e em caso de falta de refrigeração do combustível nuclear não reage da mesma forma que a liga composta de zircônio.

Então, dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo principal apresentar argumentos contundentes sobre a possibilidade de substituir os atuais revestimentos de Zircaloy nos reatores PWRs, pelo material cerâmico Carbetto de Silício reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS), face às suas inúmeras vantagens. Para avaliar a possibilidade da substituição, o SiC HNS foi submetido a algumas análises neutrônicas, termo-hidráulica e termodinâmica, através de códigos nucleares disponíveis no DEN-UFMG. Embora, existam outros revestimentos metálicos como ZIRLO<sup>TM</sup> que é uma tecnologia mais avançada em relação ao Zircaloy-4, de acordo com Hallstadius (2012), a utilização das ligas à base de zircônio parecem estar se aproximando de seus limites de atuação. Portanto, é preciso avançar em pesquisas sobre a utilização do SiC HNS, um material cerâmico promissor, mas ainda, pouco explorado neutronicamente e termicamente como revestimento de combustível nuclear.

## 1.2. Organização da tese

Esta tese foi dividida em seis capítulos e descreve as características dos revestimentos atuais e a possibilidade de substituí-los pelo SiC HNS nos reatores PWRs.

- No Capítulo 2, são apresentadas as características dos revestimentos como o Zircaloy e o carbetto de silício (SiC) com seus diversos polítipos, inclusive o SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS) que é o objeto de estudo desta tese.
- No Capítulo 3, são apresentados, de forma sucinta, os códigos, *SCALE 6.0*, *RELAP5* e *ANSYS*, através dos seus respectivos módulos.
- O capítulo 4 está subdividido em seis seções, onde é apresentada a descrição do elemento combustível do *benchmark* (ECB) que será a base para validar a metodologia utilizada. Após a validação, este elemento foi analisado sob o ponto de vista dos parâmetros neutrônicos tais como, coeficiente de reatividade de temperatura do combustível, criticalidade em *Begin Of Life (BOL)* no estado

estacionário e durante a queima do combustível, sem boro e com variações de teores de boro e de quantidades de varetas de veneno queimável, com o ECB frio e potência zero (*CZP*), com ele quente e potência máxima (*HFP*). Ainda no Capítulo 4, e em virtude da experiência que o DEN-UFMG possui com o uso do código RELAP5 e já possuir o núcleo do reator de Angra II modelado, foi feito um breve estudo termo-hidráulico com o SiC HNS como revestimento dos elementos combustíveis, cujos resultados serão comparados com o Zircaloy (atual revestimento). O objetivo é verificar as possíveis diferenças térmicas entre os dois revestimentos e como tal parâmetro pode interferir na temperatura média do combustível, cuja análise neutrônica foi realizada posteriormente.

- No capítulo 5, utilizando a metodologia desenvolvida nos capítulos anteriores, o núcleo do reator de Angra II é analisado, considerando os dois revestimentos, sob o ponto de vista neutrônico. Inicialmente, realiza-se um estudo de célula com os diferentes enriquecimentos, conforme descrito no *FSAR (Final Safety Analysis Report)* (ELETROBRAS, 2013). As células são analisadas quando submetidas às variações de boro e de temperatura do combustível, em estado estacionário à *BOL (Begin Of Life)*, e posteriormente com uma quantidade fixa de boro no moderador e variações de enriquecimento e de temperatura do combustível durante a evolução do combustível. Finalmente, a mesma metodologia é aplicada ao núcleo do reator de Angra II e são analisados os seguintes parâmetros neutrônicos: (1) fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ), (2) coeficiente de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{\text{combustível}}$ ), (3) cinética de queima do  $^{155}\text{Gd}$  e  $^{157}\text{Gd}$ , (4) variação na quantidade de boro (B) e (5) razão de conversão (C).
- No capítulo 6, é realizada uma análise térmica através do código computacional ANSYS de uma vareta de combustível do ECB, descrita no *benchmark* (OECD, 2006), imediatamente após a sua queima total e quando completamente submersa em água.
- No capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste estudo e proposta de futuros trabalhos envolvendo o revestimento SiC HNS.
- Finalmente, são listadas as referências bibliográficas que ajudaram na sustentação deste trabalho e no Anexo são apresentados os trabalhos

publicados e/ou aceitos em congressos e revistas especializadas, resultantes deste trabalho de tese.

## **CAPÍTULO 2. REVESTIMENTOS**

Em um reator à água leve (*Light Water Reactor –LWR-*) o revestimento do combustível é tão importante que o desempenho do núcleo é limitado, em grande parte, pela necessidade de proteção devido ao alto nível de estresse térmico e mecânico que o revestimento sofre (Duderstadt & Hamilton, 1976). O revestimento pode estar constantemente sob condição de transitório e acidente com o maior risco de dano, por causa de suas propriedades termoquímicas.

Devido à sua grande importância, as falhas no revestimento são muito significativas, porque através delas, poderá haver liberação de material radioativo dentro do sistema primário e isto poderá aumentar a contaminação da planta e a dose dos trabalhadores (Carpenter, 2010).

Por isso, o revestimento tem uma posição de destaque no sistema de segurança de uma planta nuclear. Portanto, é necessária uma compreensão apurada sobre os materiais que compõem os revestimentos nucleares. Os revestimentos podem ser convenientemente agrupados nas seguintes categorias: metais e cerâmicos (Callister, 2007).

Os metais são compostos por um ou mais elementos metálicos e com pequenas quantidades de elementos não metálicos. Eles possuem os seus átomos bem ordenados, relativamente densos, rígidos, resistentes e, ainda assim, dúcteis. Os metais possuem elétrons livres (banda de condução) e isso lhes proporciona uma alta capacidade de transferência de calor (Zinkle & Snead, 1998).

Os materiais cerâmicos são formados entre os elementos metálicos e não metálicos, geralmente eles consistem em óxidos, nitretos e carbetos. Os cerâmicos dentre outras características, são rígidos, resistentes a altas temperaturas, altamente suscetíveis a fraturas e não são dúcteis (Callister, 2007).

### **2.1. Zircaloy**

Os revestimentos de combustível de reatores a água leve comerciais são feitos de ligas à base de zircônio, denominada Zircaloy. Esta liga pode sofrer variações em sua



composição, mas é basicamente composta de zircônio (Zr), no entanto, possui outros elementos como, estanho (Sn), ferro (Fe), cromo (Cr), háfnio (Hf), conforme (Petrie et al., 2009).

O Zircaloy tem sido usado há mais de 50 anos, devido a sua alta resistência à corrosão, elevada resistência mecânica, alto ponto de fusão (2145 K, comparado com os 1743 K do aço inox) e baixa seção de choque de absorção de nêutrons térmicos (Hallstadius et al., 2012), além de ser um metal dúctil (Carpenter, 2006).

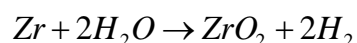
A vida de um revestimento nuclear à base de zircônio é geralmente determinada pelas suas propriedades de corrosão, isto é, a oxidação provocada pelo fluido de refrigeração e absorção de hidrogênio (Hallstadius et al., 2012).

Apesar das vantagens do Zircaloy, não se pode ignorar o fato de que, se submetido a altas temperaturas, a sua resistência à oxidação é reduzida, a absorção de hidrogênio é aumentada e a irradiação conduz para várias mudanças gradativas no nível da microestrutura do material (Hallstadius et al. 2012). Ele perde a ductilidade com o tempo e outro problema, não menos importante, é a limitação em aumentar a queima do combustível (Carpenter, 2006). Há evidências de que o Zircaloy pode aumentar a sua taxa de oxidação com queimas a partir de 35 GWd/toneladas de U (Motta, 2007).

No caso de grande perda de refrigerante (*LOCA -Loss Of Coolant Accident-*), estima-se que a temperatura do revestimento de Zircaloy do combustível, alcançará ou excederá 1273 K (1000°C) (Collier & Hewitt, 1987). Conforme *U. S. NRC* (2011) através do *CFR* (“*Code of Federal Regulations*”) entre outras exigências, ele estabelece critérios de aceitação do projeto de emergência para o sistema de refrigeração do núcleo em reatores a água leve. Em um dos critérios a ser cumprido, o projeto deve provar que em caso de *LOCA*, não haverá pico de temperatura no revestimento que exceda 1473 K, e ainda, que o hidrogênio gerado da reação Zircaloy-vapor, não ultrapasse 1% do valor teórico se todo o revestimento do núcleo do reator sofresse reação. Então, revestimento a base de zircônio é projetado para trabalhar entre 673 K e 1723 K, onde uma fortíssima reação exotérmica de oxidação entre o Zircaloy e o vapor iniciará (Stempien et al., 2013).

Ligas à base de zircônio em condições normais de operação no núcleo do reator passam naturalmente por um processo de corrosão, no qual se origina o dióxido de

zircônio na superfície do metal (McMinn et al., 2000), de acordo com a equação química abaixo. Esta corrosão é acelerada quando a liga fica submetida ao vapor que tem temperaturas elevadas, encontradas, por exemplo, durante uma grande perda de refrigerante (LOCA).



**Equação 1. Reação química do zircônio com água**

De acordo com McMinn (2000) o excesso de absorção de hidrogênio, além do limite de solubilidade, conduz à formação de hidretos, que é a principal consequência da perda de ductilidade; e juntamente com o aumento da queima do combustível (Pierron et al., 2003) são grandes responsáveis pela fragilização da liga à base de zircônio.

Em um cenário de acidente grave como o ocorrido recentemente em Fukushima, a extensão da geração de gás hidrogênio associada com a corrosão do zircônio em vapor de alta temperatura, delimita a dificuldade em controlar tal situação. Desse modo, é relevante o uso de materiais resistentes a alta temperatura. Apenas sob essa óptica, poderia se pensar em retornar ao uso do aço inox, visto que, com ele, haveria menor reação com o vapor, em decorrência da menor geração de hidrogênio. Entretanto, não custa lembrar, que o ponto de fusão do aço inox é 1743 K, ou seja, 402 K menor que o ponto de fusão da liga à base de zircônio (Zr) (Hallstadius et al., 2012).

Desde o início da utilização de ligas à base de zircônio, houve algumas combinações de elementos químicos motivados pela redução da captura de hidrogênio. Apesar das tentativas de melhorias nas ligas à base de zircônio, estes revestimentos metálicos usados em combustíveis nucleares, parecem estar se aproximando dos seus limites de atuação com a família atual do material à base de zircônio, que impõe a tais materiais revestir combustíveis com enriquecimento final de 5% de  $\text{U}^{235}$  (Hallstadius et al. 2012).

Na Tabela 1, são mostradas algumas dessas ligas de revestimentos modernos em peso percentual, onde se observa que o Zircaloy-4 (amplamente utilizado nos reatores nucleares) não tem em sua composição a presença do níquel (Ni), com o objetivo de

reduzir a absorção do hidrogênio e, desse modo, aumentar a resistência à corrosão em relação ao Zircaloy-2 (Lobo & Andrade, 2010).

**Tabela 1. Revestimentos à base de zircônio (Hallstadius et al., 2012)**

<b>(%) em peso</b>	<b>Zircaloy-2</b>	<b>Zircaloy-4</b>	<b>ZIRLO</b>	<b>Zr-1%Nb</b>
Estanho	1,20 - 1,70	1,20 - 1,70	1,0	---
Nióbio	---	---	1,0	1,0
Ferro	0,07 - 0,20	0,18 - 0,24	0,1	0,05
Cromo	0,05 - 0,15	0,07 - 0,13	---	---
Níquel	0,03 - 0,08	---	---	---
Zircônio	~98	~98	~98	~99

O ZIRLO é uma liga que foi desenvolvida nos anos 1990 pela Westinghouse, com o objetivo de substituir as ligas clássicas usadas na indústria nuclear. Além da composição citada na Tabela 1, o ZIRLO possui 1100 ppm de oxigênio (O) que deixou de ser classificado como impureza e passou a fazer parte de sua composição (Lobo & Andrade, 2010). Ele apresenta maior resistência à corrosão e estabilidade dimensional maior que a do Zircaloy-4 (Montes et al., 1998). Esse melhor desempenho à corrosão é devido a sua microestrutura que apresenta uma distribuição fina de partículas dos tipos Nb-beta e ZrNbFe (Lobo & Andrade, 2010)

Embora haja evolução nos revestimentos de combustíveis nucleares usando as ligas metálicas à base de zircônio, as limitações impostas a esses materiais como o aumento do enriquecimento e a extensão da queima, parecem apontar para uma nova direção, com a pesquisa de novos materiais, tendo como base o carbeto de silício.

A utilização do carbeto de silício possibilita o aumento do enriquecimento do combustível, que gera vantagens como: extensão da queima, aumento do fator de disponibilidade e redução da probabilidade de exposição durante as recargas, além de comportar de forma diferente em caso de falta de refrigeração adequada do combustível.

## 2.2. Carbetto de Silício (SiC)

Os materiais cerâmicos são compostos formados entre elementos metálicos e não metálicos, para os quais, as ligações interatômicas ou são, totalmente iônicas ou predominantemente iônicas, tendo, porém, alguma natureza covalente, ou até mesmo, totalmente covalente; muitas cerâmicas exibem uma combinação desses dois tipos de ligação (Callister, 2007).

Os materiais cerâmicos sempre estiveram presentes no cotidiano das pessoas, como utensílio doméstico, revestimento de pisos e paredes. Entretanto, nos últimos anos, esses materiais ganharam maior notoriedade em face da grande utilidade que os mesmos possuem em diversos nichos, tais como em componentes eletrônicos, computadores, indústrias aeroespacial e nuclear, conforme mostrado na Figura 1.

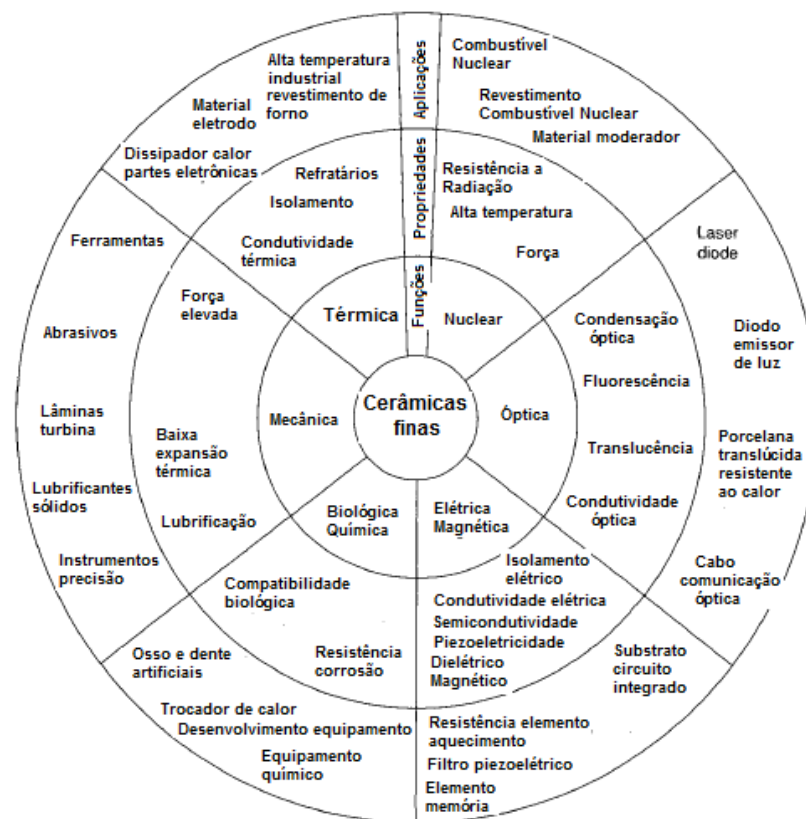
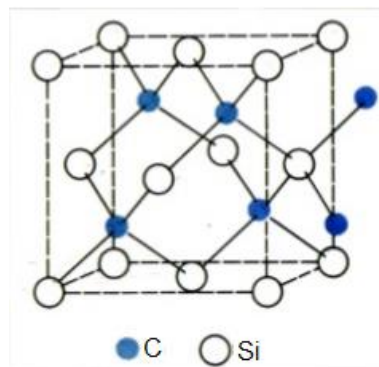


Figura 1. Funções, propriedades e aplicações de novos cerâmicos. Extraída e adaptada do Escritório de Cerâmicas finas, do Ministério do Comércio Internacional e da Indústria, Tóquio. (Ohring, 1995)

Alguns dos materiais cerâmicos comuns são aqueles nos quais existem iguais números de cátion e de ânion. Estes são referidos como os compostos AX, onde A denota o cátion e X o ânion. Existem várias estruturas cristalinas para os compostos AX; cada uma é normalmente denominada de acordo com um material comum que assume essa estrutura específica (Callister, 2007).

A estrutura cristalina da qual faz parte o carbetto de silício (SiC) é denominada blenda de zinco, ou esfalerita. Na Figura 2, é mostrada uma célula unitária, onde todos os vértices e as faces da célula cúbica estão ocupadas por átomos de silício (Si), enquanto os átomos de carbono (C) preenchem as posições tetraédricas do cubo (Callister, 2007).



**Figura 2. Célula unitária para a estrutura cristalina da esfalerita (SiC). Adaptada de (Callister, 2007).**

As propriedades do carbetto de silício estão fortemente relacionadas com sua estrutura cristalina e também sua complexidade, uma vez, que existem mais de 200 polítipos dessas estruturas. Na Figura 3, são mostrados polítipos que é um resultado da combinação de diferentes empilhamentos de camadas duplas e das temperaturas onde as fases alfa-SiC ou beta-SiC tornam-se mais estáveis (Li, 2013, Snead et al., 2007, Fisher & Barnes, 1990).

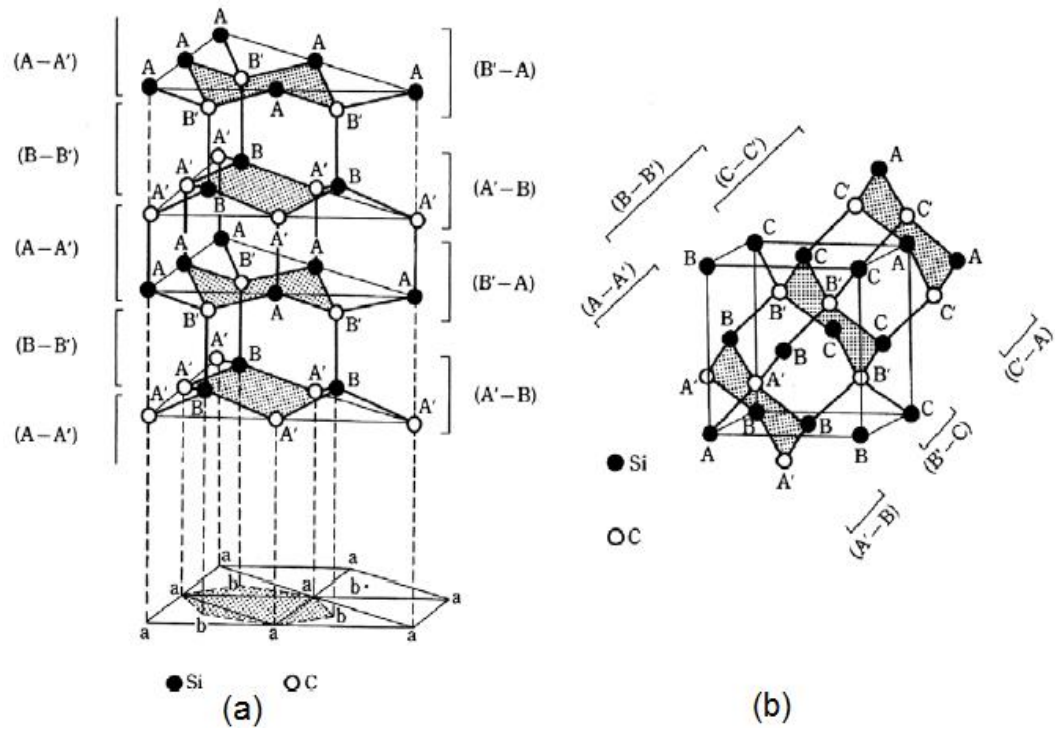


Figura 3. Estrutura cristalina nas fases (a) alfa-SiC e (b) beta-SiC (Snead et al., 2007)

A unidade estrutural fundamental em todos os polítipos do SiC é uma ligação covalente primária, coordenação tetraédrica, onde temos um átomo de silício (Si) centrado de quatro átomos de carbono (C) ou vice-versa (Snead et al., 2007).

O estudo de materiais cerâmicos para aplicações nucleares, em ambientes de altas temperaturas e elevada incidência de radiação, vem ocorrendo desde a década de 1975 (Rovner et al., 1975), especialmente para serem utilizados estruturalmente em reatores refrigerados a gás (CEGA, 1993) e como matriz para pastilhas de combustíveis (Alkan et al., 2001).

Como cerâmica estrutural, o carbeto de silício (SiC) possui propriedades desejáveis que o torna forte candidato a substituir o Zircaloy nos revestimentos do combustível nuclear de reatores água leve. Dentre elas, destacam-se as estabilidades química e térmica em altas temperaturas; as propriedades térmicas e neutrônicas (Stempien et al., 2013).

De acordo com Hallstadius (2012), Carpenter (2008), Newsome (2007), Carpenter (2006) e Heinisch (2002) o carbeto de silício (SiC) é quimicamente menos ativo que o Zircaloy, mais resistente à corrosão e mais resistente à fragilização provocada pelo

hidrogênio. Testes de oxidação do Zircaloy e SiC em vapor à temperatura de 1473 K (1200 °C) mostraram que o SiC oxida muito menos que o Zircaloy apesar de ficar submetido à exposição durante um tempo muito superior (Arnold, R., McKrell, T. e Kazimi, M. S., 2011).

Enquanto os revestimentos atuais à base de zircônio usados em reatores LWR tem uma oxidação de 17% depois de exposto durante 400 s em um ambiente onde a temperatura do vapor chega a 1493 K, o SiC não apresenta perda de massa significativa, mesmo após exposto 800 s em um ambiente cuja temperatura do vapor é 1493 K (Hallstadius et al., 2012).

Estudos realizados pelo *Massachusetts Institute of Technology*, asseguram que a resistência mecânica do carbetto de silício (SiC) permanece constante, mesmo submetido a uma temperatura de cerca de 1873 K (Carpenter, D. & Kazimi, M. S., 2010). Por outro lado, o Zircaloy apresenta uma redução na resistência mecânica de 2% para uma temperatura de 10 K além de 573 K (Pickman, D. O, 1972). O carbetto de silício altamente puro tem um ponto de fusão de 3003 K (Cotton, J., 2010), o que é muito superior ao ponto de fusão do Zircaloy-4 que é 2033 K (Hofmann, P., e Kerwin-Peck, D., 1984).

Para que o compósito  $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$  (fibra de carbetto de silício/matriz do carbetto de silício) possa ser utilizado como material estrutural, é necessário que ele possua resistência mecânica e flexibilidade. Para isso, são fornecidas ao compósito, fibras de SiC. No compósito, as fibras de SiC são dispostas paralelamente ou trançadas (Li, 2013), ligadas entre si por diferentes processos químicos. Conforme Li (2013) as fibras proporcionam a capacidade de resistir a fraturas localizadas, sem que toda a estrutura falhe. A matriz ainda serve como uma vedação hermética, impedindo assim a liberação de produtos de fissão.

O revestimento de compósito  $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$ , mantém a resistência e baixa taxa de corrosão em elevadas temperaturas, como o que ocorre em um *LOCA* (Yueh et al., 2010).

A Figura 4 mostra alguns tubos de revestimentos de carbetto de silício, (a) monolítico, (b) duplex, (c) tríplex (Hallstadius et al. 2012) e (d) multicamadas (CANES).



**Figura 4. Tubos de revestimentos de carbeto de silício (a) monolítico, (b) duplex (CANES), (c) tríplex (Hallstadius et al. 2012) e (d) multicamadas (CANES).**

O carbeto de silício (SiC) tem alta condutividade térmica comparado com a maioria dos materiais cerâmicos e alguns metais. Comparado com o Zircaloy, o SiC tem um coeficiente de expansão térmica mais baixo e taxa de fluência de calor inferior. A condutividade térmica elevada e um coeficiente de expansão térmica baixo, torna o SiC menos suscetível a choques térmicos (Stempien et al., 2013).

Apresenta ainda uma resistência superior à deformação plástica e seção de choque de absorção de nêutrons térmicos aproximadamente 25% menor que o revestimento à base de zircônio para a mesma espessura do revestimento. Durante a operação normal do reator ausência de pico de absorção de hidrogênio, prolongando assim o seu uso, mesmo quando o núcleo do reator esteja submetido a altas queimas. Além de não reagir da mesma forma que o Zircaloy em caso de LOCA (Stempien, et al., 2013; Hallstadius et al., 2012; Newsome et al., 2007; Carpenter, 2006 e Heinisch et al., 2002).

Tubos do monolítico SiC (Figura 4.a) são muito fortes, apesar disso, eles podem se quebrar quando submetidos a choques mecânicos. Para superar esta fragilidade, o SiC pode ser feito de um compósito que consiste em fibras cerâmicas que são incorporadas em sua matriz, através da técnica denominada infiltração por vapor químico (*Chemical Vapor Infiltration –CVI-*) e então, o compósito à base de carbeto de silício passa a ser identificado como  $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$  (Hallstadius et al., 2012).

O SiC é uma combinação predominantemente covalente, leve e forte com propriedades como, baixo coeficiente de expansão térmica, elevada condutividade



térmica, resistência e dureza. O carbeto de silício é um cerâmico promissor para a substituição dos metais e ligas convencionais de óxidos cerâmicos (Rashed, 2002). Estas características podem aumentar a economia no processo de recarga e a segurança das instalações nucleares, inclusive no armazenamento do combustível queimado na piscina por causa da menor afinidade com o hidrogênio.

A produção do SiC dentre outras formas, inclui pós e fibras que têm alta resistência à tração e elevado módulo de elasticidade. As propriedades termofísicas, especialmente condutividade térmica, são dependentes do processo de fabricação (Zinkle & Snead, 1998). A estabilidade do polítipo SiC é primariamente dependente da temperatura (Snead et al., 2007 e Jepps & Page, 1983). O SiC pode ter sua elasticidade reduzida em diferentes temperaturas e pode ter aumento na composição percentual de oxigênio, o que poderá alterar o seu comportamento (Takeda et al., 1998).

O revestimento cerâmico, como os compósitos de carbeto de silício (SiC/SiC), tem sido constantemente avaliado para ser utilizado em reatores de quarta geração. Entretanto, eles possuem potencial para ser aplicado nos reatores de terceira geração, o que parece permanecer viável e economicamente atrativo por pelo menos centenas de anos (Hallstadius et al., 2012). Este fato abre o precedente, pois a grande maioria dos reatores comerciais possuem tecnologias inferiores, mas com essa possibilidade pode tornar viável a implementação de sistemas mais seguros e capazes de aumentar a eficiência dos reatores nucleares comerciais em operação.

Caso o SiC seja considerado adequado para o uso como revestimento de LWR, ele pode permitir vários avanços, inclusive o aumento na margem de segurança em projetos de base, tais como o acidente por perda de refrigerante. Ele melhora a utilização dos recursos via uma queima além do limite atual de 62 GWd/tonelada de U (*U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2000*) e melhora a gestão de resíduos via baixa ativação do material do revestimento (Stempien et al., 2013).

Os autores Lara-Curzio (1998), Munro (1997), Morton (1995) e Kingery et al (1976) estão de acordo que o carbeto de silício pode ser monolítico (SiC) ou compósitos (SiC/SiC), e que o calor específico ( $c_p$ ) é dependente da temperatura. Entretanto, divergem quanto ao intervalo de temperatura que o calor específico varia. Na Tabela 2, é mostrado o calor específico em função da temperatura.

**Tabela 2. Calor específico em função da temperatura**

Temperatura (K)	Calor específico (J/kg.K)
293	620-640 <sup>(a)</sup>
773	1134 <sup>(b)</sup>
973	1189 <sup>(b)</sup>
1273	1200-1250 <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup>Lara-Curzio, 1998; Munro, 1997; Morton, 1995 e Kingery et al., 1976

<sup>(b)</sup>Morton, 1995 e Kingery, et al., 1976

De acordo com Zinkle & Snead (1998), a maior variação no calor específico ocorre em temperaturas inferiores a 473 K (200 °C).

A condutividade térmica do compósito SiC/SiC é fortemente dependente das condições de processamento, do tipo e arquitetura da fibra, além da temperatura. O aumento da temperatura provoca redução na condutividade térmica (Zinkle & Snead, 1998), da mesma forma que a radiação também reduz a condutividade térmica, mas ainda assim, é comparável aos revestimentos à base de zircônio (Snead et al., 2007).

Estudos anteriores (Dobisesky, 2009) examinaram a possibilidade de utilização do SiC como um material de revestimento de combustível em um reator a água pressurizada. O carvão de silício é praticamente inerte ao vapor de alta temperatura, possui taxa de oxidação muito inferior ao Zircaloy, sendo assim, é muito eficaz no impedimento da liberação de material radioativo. Essas características asseguram à indústria um combustível mais robusto que poderia resistir a um aumento de potência com mais eficiência e sem o comprometimento da segurança das instalações nucleares. Apesar de existir um limite do pico de queima médio por vareta de 62 MWd/kgU (NRC, 1997), alguns estudos sugerem que com o uso do SiC, esse potencial pode ser aumentado, permitindo uma queima maior (Olander, 2001).

No entanto, as vantagens da substituição do revestimento Zircaloy não são claras na literatura sob o ponto de vista de análise termo-hidráulica e neutrônica. Revisões da literatura foram feitas para prever o comportamento termomecânico do SiC a temperaturas elevadas (Bloore, 2005), uma vez, que não há estudos suficientes que

possam ser comparados em reatores tipo PWR usando o SiC, pois todos os estudos de análise de segurança são realizados utilizando como referência o Zircaloy.

Diversas técnicas têm sido desenvolvidas para a fabricação de materiais compósitos com matriz de SiC, incluindo infiltração por fusão, infiltração de polímero e de pirólise, a infiltração de vapor químico (CVI) (Kotani et al., 2001; Naslain, 2004; Shimoda, et al., 2009), deposição de vapor químico (CVD) e sol gel, tudo com a finalidade de reforçar a matriz do compósito cerâmico (CMC).

Dentro dessas técnicas, existem aquelas que são mais vantajosas e que são aplicadas, como pode se destacar a pirólise, que tem a vantagem de flexibilidade em relação ao CVD ou processo de sinterização (Yajima, et al., 1976). Outra técnica bastante segura é a CVI, que possibilita a produção de uma matriz com um elevado grau de pureza e boa resistência à irradiação (Deck et al., 2012).

A diversidade na produção de compósito com carbetos de silício é tão grande, que a mesma pode ser analisada, em sua composição, no tratamento térmico que recebe, como é a formação dos grãos, se passa por processo de sinterização na presença de algum tipo de gás inerte e a que temperatura isso ocorre, se a arquitetura das fibras é colocada uma sobre a outra, se o ângulo entre as fibras é  $0^\circ$  ou  $90^\circ$  (Youngblood & Jones; Senor et al., 1996), enfim, são muitas as possibilidades.

O entendimento do comportamento dos metais em geral, tem evoluído muito nos últimos 100 anos (Hallstadius et al., 2012). Em contrapartida, o banco de dados de compósitos SiC/SiC ainda é bastante limitado (Zinkle & Snead, 1998), por se tratar de material de uso estratégico. As abordagens atuais são essencialmente empíricas (Hallstadius et al., 2012).

A falta de modelos preditivos para compósitos cerâmicos leva a problemas com a concepção e produção. Desse modo, a incompreensão fenomenológica conduz a uma situação em que modelos empíricos e conhecimento não muito ortodoxo, precisam ser utilizados durante a fabricação para otimizar as condições de processamento (Hallstadius et al., 2012).

Existem muitos dados publicados com vários compósitos cerâmicos com diversas fibras, conforme mostrado na Tabela 3, onde se observam algumas propriedades

físicas dos compósitos com fibras à base de carbeto de silício (SiC), à temperatura de 293 K (20 °C) (Takeda et al., 1996, Lipowitz et al., 1997, Osborne, 1997, Youngblood et al., 1997).

**Tabela 3. Algumas propriedades físicas de compósitos com fibras à base de SiC**

	cg-Nicalon	Hi-Nicalon	Hi-Nicalon Tipo S	Dow Sylramic	SiC granel
Diâmetro ( $10^{-6}$ m)	14	12-14	12	10	---
Resistência à tração (GPa)	2,0-3,0	2,8-3,4	2,6-2,7	2,8-3,4	~0,1
Módulo de elasticidade (GPa)	170-220	270	420	390-400	460
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	2,55	2,74	2,98-3,10	3,0-3,10	3,25
Coefficiente de expansão térmica ( $10^{-6}/\text{K}$ )	3,2	3,5	---	5,4	4,0
Condutividade térmica (W/m.K)	1,5	4	18	40-45	100-350
Teor de oxigênio (peso %)	11,7	0,5	0,2	0,8	0,0
Proporção atômica (C/Si)	1,31	1,39	1,05	1,0	1,0

Estudos relataram que uma fibra de SiC com redução do teor de oxigênio e estabilidade térmica melhorada, é alcançada usando um método de curta irradiação (Okamura et al., 1989; Takeda et al., 1991; Takeda et al., 1992).

Apesar desse cenário promissor, alguns compósitos são fabricados com fibras de baixa qualidade, como por exemplo, cg-Nicalon (Zinkle & Snead, 1998) e da indisponibilidade de algumas propriedades termofísicas das fibras de alta qualidade.

Então, como alternativa, neste trabalho foi usado o SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS), que apresenta maior elasticidade, maior resistência à oxidação, resistência superior à deformação e redução no teor de oxigênio (Takeda et al., 1998).

As análises neutrônicas e de transferência de calor realizadas nesta tese, são realizadas através do sistema de códigos *SCALE 6.0*, *RELAP5* e *ANSYS*.

### CAPÍTULO 3. CÓDIGOS UTILIZADOS

O sistema de código *Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation (SCALE)*, de acordo com Bowman (2008) vem sendo desenvolvido desde os anos de 1969, quando a Divisão de Tecnologia e Ciência Nuclear do Laboratório Nacional Oak Ridge (ORNL), começou a fornecer suporte computacional no uso do *KENO* à Comissão de Energia Atômica (AEC) dos Estados Unidos da América. De 1969 a 1976, a equipe do AEC contou com o apoio do pessoal da ORNL para ajudá-los na correta utilização do código, na interpretação de dados de criticalidade e análises de transferência de calor.

Após a criação da central nuclear dos EUA, a *Nuclear Regulatory Commission (NRC)* da AEC, a equipe da NRC propôs o desenvolvimento de um sistema de fácil análise e que fornecesse as capacidades técnicas dos módulos individuais. Foi assim, que nasceu o sistema de código *SCALE*. Com o desenvolvimento do *SCALE*, foi preciso estabelecer objetivos na utilização desse sistema. Desse modo, estabeleceu-se que o *SCALE* deveria estar principalmente relacionado com: (1) o projeto e as instalações do combustível nuclear; (2) o uso de computadores e dados de bibliotecas neutrônicas; (3) um formato adequado de entradas para o usuário; (4) os módulos de controle e funcionais para uma sequência de análise padrão; e (5) o fornecimento de uma documentação completa e disponível à consulta pública (Bowman & Dunn, 2009).

De acordo com Bowman & Dunn (2009), a característica mais marcante do sistema de código *SCALE*, é a sua capacidade de reduzir o esforço que o usuário teria para preparar misturas adequadas de materiais em problemas que são dependentes do processamento das seções de choques.

O sistema de código *SCALE* usado nas modelagens e simulações nesta tese, é a versão 6.0. Esta versão possui vários módulos e diversas bibliotecas neutrônicas de energia contínua e colapsadas. O *SCALE 6.0* oferece certo grau de liberdade, pois permite ao usuário fazer as entradas através de palavras-chaves em diversas sequências obedecendo apenas às exigências de cada módulo. Os módulos do *SCALE 6.0* usados são, *CSAS*, *TRITON (KENO VI e NEWT)*.

### 3.1. CSAS

O *Criticality Safety Analysis Sequence (CSAS)* é um módulo que realiza cálculos de criticalidade para o fator de multiplicação de nêutrons ( $k$ ) via *KENO VI*, no estado estacionário. Esse módulo apresenta dados de entrada simples e prepara as seções de choque para o cálculo do ( $k$ ) em um sistema tridimensional através *do KENO VI*, um módulo funcional do *SCALE 6.0* (Goluoglu et al., 2009). Os resultados desses cálculos, são fornecidos com um desvio padrão ( $\sigma$ ) do próprio código e seu grau de precisão está em função do número de partículas fornecidas na entrada pelo usuário.

No sistema de controle do módulo *CSAS* está a biblioteca de sub-rotinas, assim referida como Biblioteca Processadora de Informação de Material (MPLIB). Esta biblioteca permite ao usuário especificar problemas de materiais usando palavras-chaves que são facilmente associadas com as misturas, com elementos e com núclídeos fornecidos na composição da biblioteca padrão.

### 3.2. TRITON (KENO VI e NEWT)

De acordo com DeHart (2009), o módulo de controle *TRITON* foi desenvolvido em conjunto com o *KENO-VI* e *ORIGEN-S* e realiza cálculos de evolução do combustível. Pode ser usado para fornecer de forma automatizada problema dependente da seção de choque seguido de cálculo do fator de multiplicação ( $k$ ) para uma configuração em duas dimensões e através do *ORIGEN-S* para fazer previsões quanto às concentrações isotópicas, do termo fonte e do calor de decaimento com variação de fluxo ao longo do tempo, seja de forma determinística em 2-D ou de forma estocástica em 3-D.

O *TRITON* aceita várias sequências analíticas, cada uma com seus projetos e aplicações, dentre elas pode ser citada: o *t6-depl* que é uma sequência indicada pelo usuário disponível através do módulo de controle *TRITON6* que utiliza o módulo funcional *KENO VI*, seguido pelo módulo de colapsamento *KMART6*.

O módulo *NEWT* realiza a preparação da seção de choque para o cálculo de transporte e é executado de forma automática. É usado para o cálculo do fator de multiplicação

de nêutrons ( $k$ ) durante a evolução do combustível e de forma determinística em duas dimensões. Comumente é usado em cálculo de célula de combustível também durante a evolução do combustível nuclear, via *ORIGEN-S* (DeHart, 2009).

### 3.3. RELAP5

O código *RELAP5/MOD3* é uma das últimas versões do código *RELAP5* que foi lançado em 1979 (Ransom et al., 1979). Inicialmente, este código foi usado principalmente pela *Idaho National Engineering (INEL)*, para a compreensão do Teste de Perda de Vazão (*LOFT*). Desde então, o código tornou-se amplamente utilizado em análise de segurança em reatores de água leve (*LWR*) juntamente com os seus sistemas relacionados (*U. S. Regulatory Commission, 1995*).

O código *RELAP5* foi desenvolvido para uma melhor estimativa de simulação de transitórios em sistemas de refrigeração de reatores de água leve durante acidentes. O código modela o comportamento acoplado do sistema de refrigeração do reator e do núcleo para acidentes com perda de refrigerante, e transientes operacionais, como transitórios antecipados sem *scram* (desligamento), perda de energia elétrica, perda de refrigerante e perda de vazão. Utiliza-se uma abordagem de modelagem genérica que permite simular uma variedade de sistemas hidráulicos térmicos. Os sistemas de controle e os componentes do sistema secundário são incluídos para permitir a modelagem de controles de plantas, turbinas, condensadores e sistemas secundários de água de alimentação (*U. S. Regulatory Commission, 1995*).

O modelo termo-hidráulico *RELAP5* resolve oito equações de campo para oito variáveis primárias. As variáveis primárias dependentes são: a pressão, as energias internas específicas de fase, fração de volume de vapor (fração de vazão), as velocidades de fase, o título não condensável e densidade de boro. As variáveis independentes são o tempo e a distância.

As estruturas de calor fornecidas no *RELAP5* permitem o cálculo do calor transferido através de limites sólidos de volumes hidrodinâmicos. As capacidades de modelagem de estruturas de calor são gerais e incluem simulações de pinos ou placas de combustível nuclear com aquecimento elétrico, ou a transferência de calor através de

tubos do gerador de vapor e transferência de calor da tubulação e paredes dos vasos. As estruturas de calor são representadas por condução de calor unidimensional em geometrias retangulares, cilíndricas ou esféricas. Multiplicadores de superfície são usados para converter a unidade de cálculo de uma dimensão para a superfície real da estrutura de calor (*U. S. Regulatory Commission, 2001*).

A condutividade térmica e as capacidades volumétricas de calor como funções de temperaturas podem ser introduzidas em tabelas. O método de diferenças finitas é usado para avançar nas soluções de condução de calor. Cada intervalo da malha pode conter diferentes espaçamentos, material diferente ou ambos. As condições de contorno podem ser inseridas em forma de tabelas de temperatura da superfície, taxa de transferência de calor, coeficiente de transferência de calor, tudo em função da temperatura, ou o coeficiente de transferência de calor em função da temperatura da superfície.

### **3.4. ANSYS**

As simulações da vareta de combustível foram implementadas através do código ANSYS módulo CFX. Um código computacional de dinâmica de fluidos que permite a avaliação da temperatura em uma geometria real e outras quantidades físicas em simulações térmicas (ANSYS, 2009). Neste código, a solução numérica das equações diferenciais parciais que regem a propagação do calor através de diferentes partes da geometria baseia-se na técnica do método dos elementos finitos. Para isso, foi utilizado a ferramenta *Designer Modeler* do código (ANSYS, 2009). Essa ferramenta contém poderosos recursos de detalhamento geométrico, que permitiu, através do dispositivo *ANSYS Cut Material* (Pereira et al., 2016), que fossem feitas a análise de temperatura de elemento por elemento e, ainda, considerando a vizinhança.



## **CAPÍTULO 4. VALIDAÇÃO DO MODELO DO ECB E APLICAÇÃO DO NOVO REVESTIMENTO**

A validação do modelo do elemento combustível do benchmark (ECB) de um PWR, descrito no benchmark (OECD, 2006) e da modelagem feita neste trabalho, é através da comparação do resultado do cálculo de criticalidade. Após esta validação, houve a substituição de todo o revestimento de Zircaloy (convencional) do ECB pelo monolítico carbeto de silício (SiC) reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS), cujos valores do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) serão comparados no estado estacionário e durante a evolução do combustível.

### **4.1. Descrição do *benchmark***

O ECB estudado está disposto em um arranjo 17 x 17 posições de um reator a água pressurizada (*PWR*), com 24 tubos guias, um tubo guia central, 456 ppm de boro diluído no moderador, com varetas de  $UO_2$  com urânio  $^{235}U$  enriquecido a 4,0% e sem utilização de veneno queimável (OECD, 2006).

Na Figura 5 (a), é mostrada a geometria da célula de combustível e a (b) geometria da célula do tubo guia. Na Figura 6, é mostrado como um elemento combustível é montado (iniciando pela pastilha, vareta, esqueleto do elemento e finalmente o elemento combustível). Na Figura 7, é mostrado o elemento combustível com 24 tubos guias e um tubo guia central.

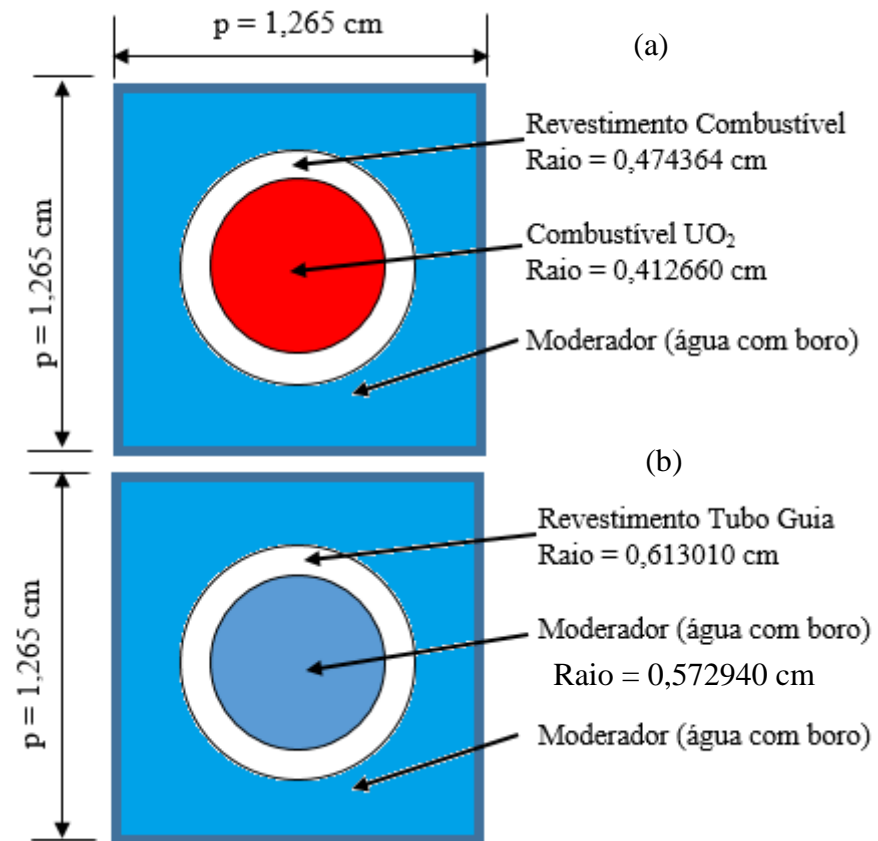


Figura 5. (a) Célula do combustível e (b) Célula do tubo guia.

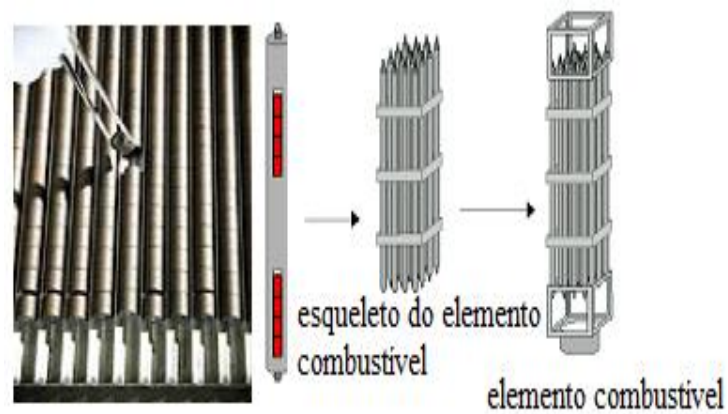
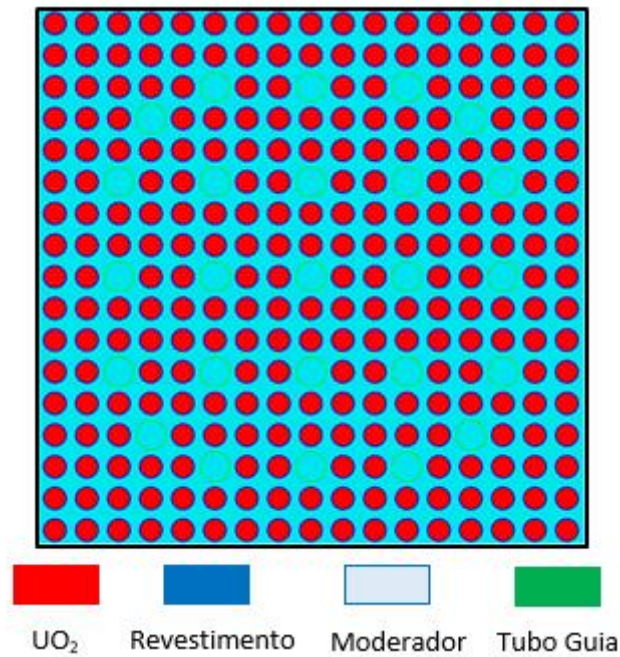


Figura 6. Pastilhas, varetas, esqueleto e elemento combustível (INB, 2013).



**Figura 7. Geometria do elemento combustível com 24 tubos guias e um tubo guia central.**

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados outros parâmetros e composições utilizados na modelagem do elemento combustível, respectivamente.

**Tabela 4. Parâmetros do elemento combustível modelado e simulado (OECD, 2006)**

Descrição	Valores
Comprimento ativo da vareta de combustível ou tubo guia	365,7 cm
Raio do combustível	0,412660 cm
Raio do revestimento do combustível (Zircaloy)	0,474364 cm
Raio interno do tubo guia	0,572940 cm
Raio externo do tubo guia	0,613010 cm
Passo do reticulado barras (p)	1,265 cm
Passo do reticulado do elemento combustível	21,505 cm
Temperatura do Combustível	873 K
Temperatura do Revestimento (Zircaloy)	673 K
Temperatura do moderador	573 K
Potência específica	38 W/gU

Tabela 5. Composição dos materiais modelados e simulados (OECD, 2006)

Composições dos materiais com densidade atômica em (atom/barn.cm)							
Combustível (UO <sub>2</sub> ) Enriquecido a 4,0%		Revestimento do Combustível		Tubo Guia		Refrigerante (Água com 456 ppm de boro)	
U-234	$7,834 \cdot 10^{-6}$	Fe	$1,383 \cdot 10^{-4}$	Fe	$1,476 \cdot 10^{-4}$	H	$4,860 \cdot 10^{-2}$
U-235	$9,097 \cdot 10^{-4}$	Cr	$7,073 \cdot 10^{-5}$	Cr	$7,549 \cdot 10^{-5}$	O	$2,430 \cdot 10^{-2}$
U-238	$2,155 \cdot 10^{-2}$	O	$2,874 \cdot 10^{-4}$	O	$3,067 \cdot 10^{-4}$	<sup>10</sup> B	$3,692 \cdot 10^{-6}$
O-16	$4,493 \cdot 10^{-2}$	Zr	$3,956 \cdot 10^{-2}$	Zr	$4,222 \cdot 10^{-2}$	<sup>11</sup> B	$1,477 \cdot 10^{-5}$

#### 4.2. Modelagem do elemento combustível do *benchmark* (ECB)

A modelagem do ECB foi realizada através dos módulos *CSAS* e *TRITON-KENO* do sistema de código *SCALE 6.0*, que permite diferentes formas de fazer a entrada das composições, dentre elas, a densidade dos elementos com a dimensão em (g/cm<sup>3</sup>) e a densidade atômica ou em peso percentual. Neste trabalho, foi usada a densidade atômica, cuja dimensão é (atom/barn.cm), conforme consta nas tabelas onde estão descritas as composições.

Devido à ausência das bibliotecas utilizadas no documento publicado pela OECD (2006), foram utilizadas as bibliotecas de energia contínua, ENDF/ B-VI.8 e ENDF/B-VII.0, a ENDF/B-V colapsada de 44 grupos e a ENDF/B-VII.0 colapsada de 238 grupos, a fim de identificar o impacto da utilização das diferentes bibliotecas para a análise do ECB no estado estacionário e com a evolução do combustível.

As bibliotecas de energia contínua são as mais completas disponíveis no sistema de código *SCALE*. Apesar disso, a versão do *SCALE* disponível no DEN/UFMG, permite o uso de tais bibliotecas apenas para o cálculo de criticalidade no estado estacionário. Para o cálculo de criticalidade no estado estacionário através do módulo *CSAS6*, foram utilizadas 5000 partículas e 243 gerações. Para a análise da evolução do

combustível ao longo do tempo, foram usadas as bibliotecas colapsadas, 1000 partículas e 1100 gerações.

Para identificar o impacto das diferentes bibliotecas nucleares no cálculo da criticalidade no estado estacionário, serão usados a média, o desvio padrão (DP) e o desvio padrão relativo (DPR) do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ). Para isso, serão utilizadas as equações (2), (3) e (4) respectivamente, onde P representa o número de participantes/número de bibliotecas e  $N_i$  o fator de multiplicação infinito inicial de cada participante/bibliotecas.

$$Média = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P N_i \quad (2)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P (N_i - Média)^2}{P}} \quad (3)$$

$$DPR = \frac{DP}{Média} \quad (4)$$

### 4.3. Resultado da validação do ECB

Na Tabela 6, são apresentados os valores do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) de vários países com os respectivos códigos. Mas apenas o DEN/UFMG (Faria et al., 2015), apresenta as bibliotecas neutrônicas e o desvio padrão de cada código nuclear ( $\sigma$ ) usado para o cálculo de criticalidade.

Os resultados mostraram que com o uso de novas bibliotecas, houve uma diminuição na média do  $k_{inf}$  e um aumento no DPR. Entretanto, o cálculo do DP entre os  $k_{inf}$  das bibliotecas oscilaram na maioria dos casos cerca de 0,056%. Os valores encontrados neste estudo com as diferentes bibliotecas usando o módulo CSAS6, estão dentro do

intervalo de valores obtidos por outras instituições validando, assim, o modelo do ECB. Os cálculos mostraram ainda que, entre as bibliotecas de seção de choque usadas neste estudo, as que sofreram menor desvio em relação às suas médias são a de energia contínua ENDF/B-VI.8 (0,053%) e a biblioteca de seções de choque de 238 grupos (V7-238) colapsada da ENDF/B-VII.0 (0,023%). As simulações seguintes foram realizadas com a biblioteca colapsada ENDF/B-VII.0, visto que, além dos cálculos no estado estacionário ela permite cálculos durante a evolução do combustível.

**Tabela 6. Comparação dos valores do  $k_{inf}$  de vários países, códigos e bibliotecas neutrônicas (Faria et al., 2015)**

Países	Instituto/Departamento	Código	Biblioteca Neutrônica	$k_{inf}$	Desvio código ( $\sigma$ )
França	CEA	CRISTAL 1.0	-	1,34025	-
Reino Unido	BNFL SERCO	MONK8B MONK8B	- -	1,34180 1,34110	- -
Finlândia	VTT	MCNP4C	-	1,33966	-
Japão	JNES JAERI JENDL 3.3 JAERI JENDL 3.2	MVP2.0 MVP MVP	- - -	1,33913 1,33989 1,34349	- - -
Alemanha	AREVA(Framatone ANP)	KENO V.a	-	1,34025	-
EUA	ORNL	HELIOS SAS2h TRITON-KENO V.a TRITON-NEWT V.a	- - - -	1,33797 1,33797 1,33797 1,33797	- - - -
Suécia	PSI	MCNPX-2.4.0	-	1,34070	-
Brasil	DEN-UFMG	CSAS6	ENDF/B-VI.8 ENDF/B-VII.0 44 grupos (V5-44) <sup>1</sup> 238 grupos (V5-238) <sup>2</sup> 238 grupos (V7-238) <sup>2</sup>	1,33650 1,34202 1,33123 1,33100 1,33584	0,00068 0,00059 0,00051 0,00052 0,00055
Média			Anterior Atual	1,33986 1,33860	
Desvio Padrão Médio			Anterior Atual	0,00169 0,00335	
Desvio Padrão Relativo Médio			Anterior Atual	0,13% 0,25%	

<sup>1</sup>Colapsada da ENDF/B-V. <sup>2</sup>Colapsada da ENDF/B-VII.0

Uma vez validado o modelo do ECB, o próximo passo foi substituir todo o revestimento de Zircaloy pelo SiC HNS e comparar os resultados dos valores do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) no estado estacionário com o módulo CSAS6 e durante a evolução do combustível com TRITON-KENO VI, além de comparar a razão entre os fluxos térmico e total com o uso dos revestimentos.

#### 4.4. Substituição do revestimento do ECB

O Zircaloy usado no combustível, nos tubos guias e no tubo guia central, foram substituídos pelo monolítico SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS), conforme composição apresentada na Tabela 7. Os demais parâmetros descritos nas Tabelas 4 e 5 serão mantidos.

Na Tabela 7, é apresentada a composição do SiC HNS, conforme (Takeda et al., 1991), cuja densidade atômica está em (atom.barn/cm).

**Tabela 7. Composição do novo revestimento (SiC HNS)**

Revestimentos: Combustível e Tubos guias	
Elemento	Densidade atômica em (atom.barn/cm)
Si	$4,5806 \cdot 10^{-2}$
C	$4,8030 \cdot 10^{-2}$
O	$2,3343 \cdot 10^{-4}$

O cálculo de criticalidade no estado estacionário usando o revestimento proposto é feito da mesma forma que a validação do ECB, ou seja, através do módulo CSAS6 com as mesmas bibliotecas neutrônicas.

Para a comparação percentual entre os valores do  $k_{inf}$  do ECB no estado estacionário e com as diferentes bibliotecas neutrônicas usando o Zircaloy e o SiC HNS, foi utilizada a Equação (5). Onde  $\Delta k$  é a variação percentual entre os valores de  $k_{inf}$ , o  $k_1$  representa o  $k_{inf}$  -padrão quando o revestimento é o Zircaloy- e  $k_2$  o  $k_{inf}$  quando o revestimento é SiC HNS.

$$\Delta k = \left( \frac{k_2 - k_1}{k_1} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

Além disso, foram feitas comparações entre o  $k_{inf}$  e a razão entre os fluxos térmico e total do ECB usando o Zircaloy e SiC HNS, com uma potência específica de 38 W/gU, durante 789,47 dias, produzindo uma queima de até 30 GWd/MTU, conforme OECD (2006).

Nas seções seguintes são apresentados os resultados em estado estacionário e durante a evolução do combustível.

#### 4.4.1. Resultado: cálculo de criticalidade do ECB com o novo revestimento em estado estacionário

Na Tabela 8, são apresentados os valores do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) para os dois revestimentos, onde o elemento combustível está identificado como Elemento *Benchmark* revestido com Zircaloy (REBZr) e Elemento *Benchmark* revestido com SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (REBSiC). Os respectivos desvios padrão ( $\sigma$ ) do código SCALE em cinco bibliotecas neutrônicas diferentes (Faria et al., 2015).

A Tabela mostra que o valor do  $k_{inf}$ , quando o revestimento é o SiC HNS, é sempre maior, não importando qual biblioteca está sendo usada. Há casos em que essa diferença atinge valores maiores que 0,5%, sugerindo que há uma economia de nêutrons térmicos, o que possibilitaria uma extensão da queima.

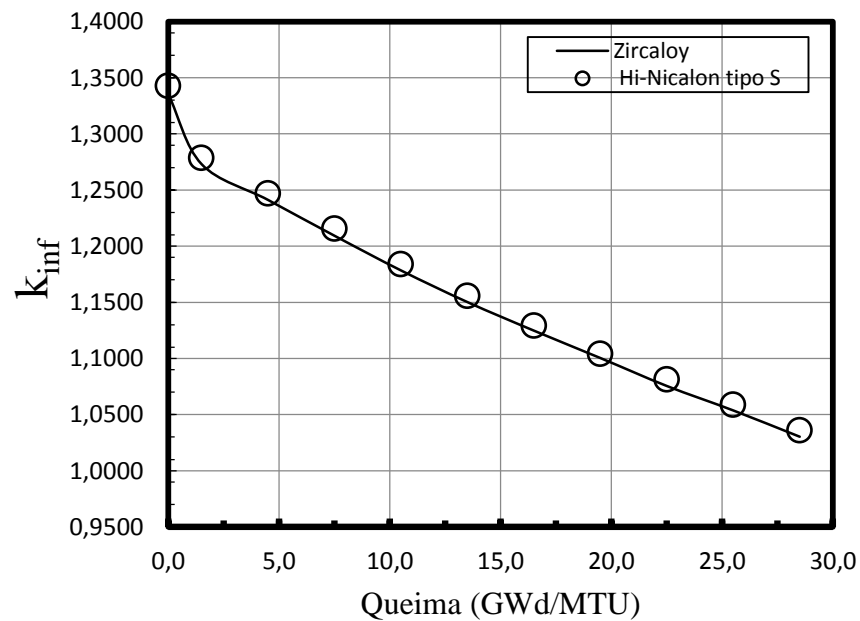
**Tabela 8. Comparação dos valores do  $k_{inf}$  para os dois revestimentos com várias bibliotecas**

Módulo CSAS6						
Boro: 456 ppm (Benchmark) - 5000 partículas						
Bibliotecas		Zircaloy		$\Delta k\%$ (SiC HNS-Zircaloy)	SiC HNS	
		REBZr	Desvio código ( $\sigma$ )		REBSiC	Desvio código ( $\sigma$ )
$k_{inf}$	CE_V6	1,33650	0,00068	0,502%	1,34321	0,00053
	CE_V7	1,34202	0,00059	0,384%	1,34717	0,00068
	V5-44	1,33123	0,00051	0,363%	1,33606	0,00054
	V5-238	1,33100	0,00052	0,300%	1,33499	0,00055
	V7-238	1,33584	0,00055	0,567%	1,34341	0,00057



#### 4.4.2. Resultado: ECB com os dois revestimentos durante evolução do combustível

Na Figura 8, é apresentada uma comparação dos valores do  $k_{inf}$  do EC usando os dois revestimentos, onde se observa o mesmo perfil gráfico nas duas situações, com uma ligeira diferença no valor do  $k_{inf}$  quando o revestimento é o SiC HNS, é sempre maior durante todo o período avaliado.



**Figura 8. Fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) para os dois revestimentos ao longo da queima.**

Na Figura 9, é mostrada a razão entre o fluxo térmico e fluxo total no combustível e nos revestimentos. Nas duas situações, há um maior endurecimento do fluxo, fato relevante, pois mostra uma economia de nêutrons térmicos quando o revestimento é o SiC HNS.

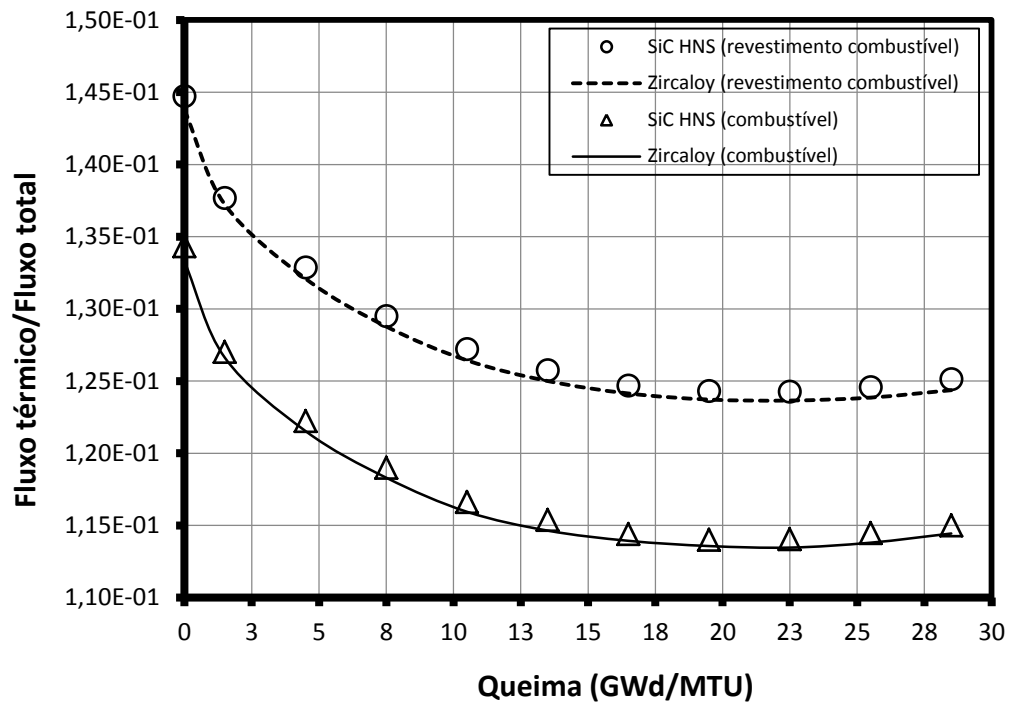


Figura 9. Razão entre o fluxo térmico e fluxo total no combustível e nos revestimentos

Apesar dos bons resultados alcançados com o modelo do ECB nas análises realizadas acima, inclusive com a substituição do revestimento convencional no estado estacionário, durante a queima do combustível, os resultados quanto ao coeficiente de reatividade de temperatura do combustível não foram satisfatórios. Ao variar a temperatura do combustível no ECB revestido com o SiC HNS, o valor desse coeficiente ficava positivo, o que impossibilitaria sua utilização (Faria et al., 2016). Entretanto, ao aumentar a temperatura média de trabalho, verificou-se que o coeficiente tornava-se negativo. Tal fato e o conhecimento das diferenças nas propriedades de transferência de calor dos revestimentos, considerou-se que a temperatura média de operação do combustível com o revestimento proposto pudesse ser diferente daquela quando se usava o revestimento convencional. Desse modo, resolveu-se investigar a transferência de calor do combustível através dos revestimentos.

Como o Departamento de Engenharia Nuclear/UFMG possui experiência na modelagem do núcleo do reator de Angra II usando o código de análise termo-hidráulica, *RELAP5* (Reis et al., 2015) e como há pretensão de propor a substituição dos revestimentos de Zircaloy usado em Angra II, pelo SiC HNS, considerou-se

importante analisar neutronicamente o seu comportamento. Entretanto, antes desta análise, faz-se necessário a comparação da transferência de calor do combustível para cada revestimento e, conseqüentemente, para o moderador, uma vez que todos os parâmetros neutrônicos são analisados considerando uma temperatura média de trabalho para cada material. Tal temperatura influencia o comportamento das seções de choque microscópicas, afetando o comportamento neutrônico. Desse modo, nas próximas seções, foram analisados e comparados o comportamento dos revestimentos Zircaloy e SiC HNS sob o ponto de vista termo-hidráulico, via código *RELAP5*.

O objetivo é quantificar a diferença na transferência de calor usando os dois revestimentos.

#### **4.5. Modelagem da vareta de combustível do núcleo do reator de Angra II**

A vareta combustível do núcleo do reator de Angra II foi modelada como uma estrutura de calor no código *RELAP5-MOD3.3* (U. S. Regulatory Commission, 2001). No modelo, a vareta combustível foi dividida axialmente em 34 volumes; radialmente tem 12 malhas divididas em regiões incluindo, combustível, *gap* e revestimento, como ilustrado na Figura 10 (a) e na Figura 10 (b), onde a divisão radial está apenas em seis regiões. Dois tipos diferentes de materiais de revestimentos foram considerados nas simulações no estado estacionário do núcleo de Angra II, mantendo o mesmo número de malhas e espaçamento, para verificar possíveis efeitos na temperatura do combustível em função dos diferentes tipos de revestimento.

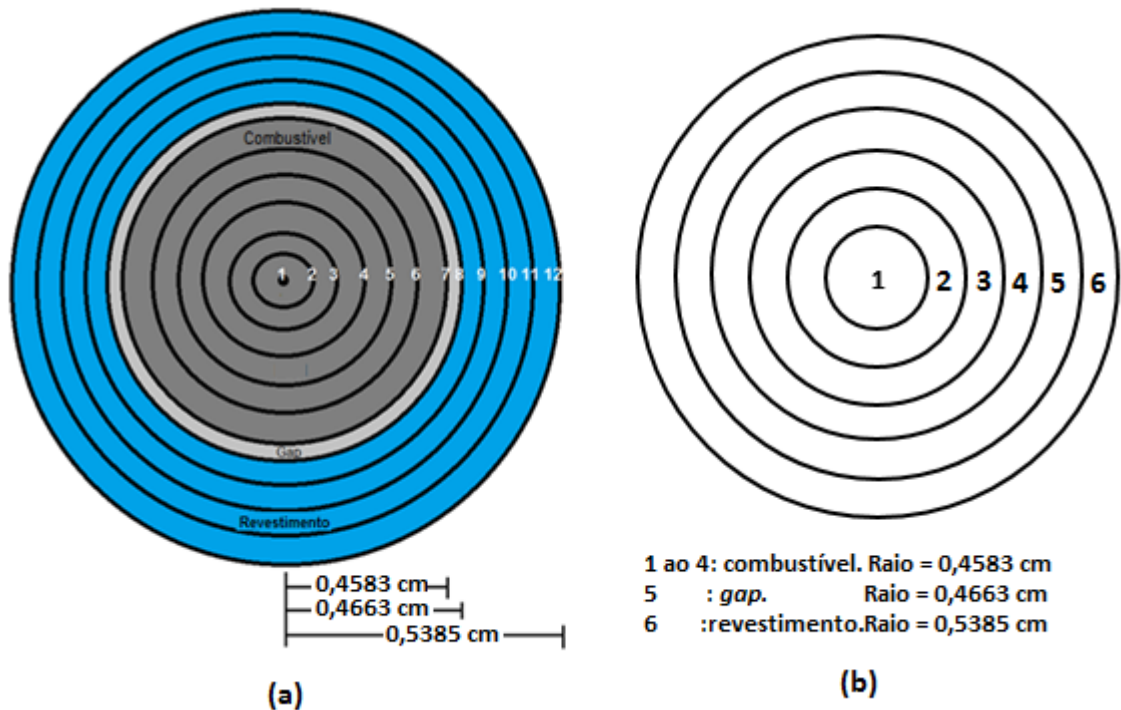


Figura 10. Vareta combustível de Angra II modelado no RELAP5 (medidas fora de escala)

Para o cálculo foi necessário fornecer algumas propriedades termofísicas do carbeto de silício, tais como a condutividade térmica, densidade, calor específico e capacidade calorífica.

A condutividade térmica ( $k_c$ ) do SiC HNS foi calculada usando a equação (6), conforme é apresentado por (Dewitt et al., 2008), em (W/mK). A difusividade térmica ( $\alpha$ ) é medida usando a técnica de flash de laser (ASTM E-1461), de acordo com (Rashed, 2002) e está em ( $m^2/s$ ), ( $\rho$ ) é a densidade ( $kg/m^3$ ) e o calor específico à pressão constante ( $c_p$ ) está em (J/kg.K).

$$k_c = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \quad (6)$$

A capacidade térmica ou capacidade calorífica de um material pode ser medida usando a técnica de calorimetria (Rashed, 2002) ou calculado a partir de dados publicados como uma função da temperatura (Kubaschewski e Alcock, 1979).

Assim, a capacidade calorífica do SiC é calculada como se segue, em que T é a temperatura na escala absoluta (K):

$$C_p = 1,267 + 4,90 \times 10^{-5} T - 1,227 \times 10^5 T^{-2} + 2,05 \times 10^7 T^{-3} \quad (7)$$

O carvão de silício que se propõe usar como revestimento no combustível nuclear e nos tubos guias, possui as propriedades térmicas mostrados na Tabela 9 que são utilizadas no cálculo da transferência do calor na região do revestimento, através do código RELAP5.

**Tabela 9. Características térmicas do SiC HNS (Rashed, 2002).**

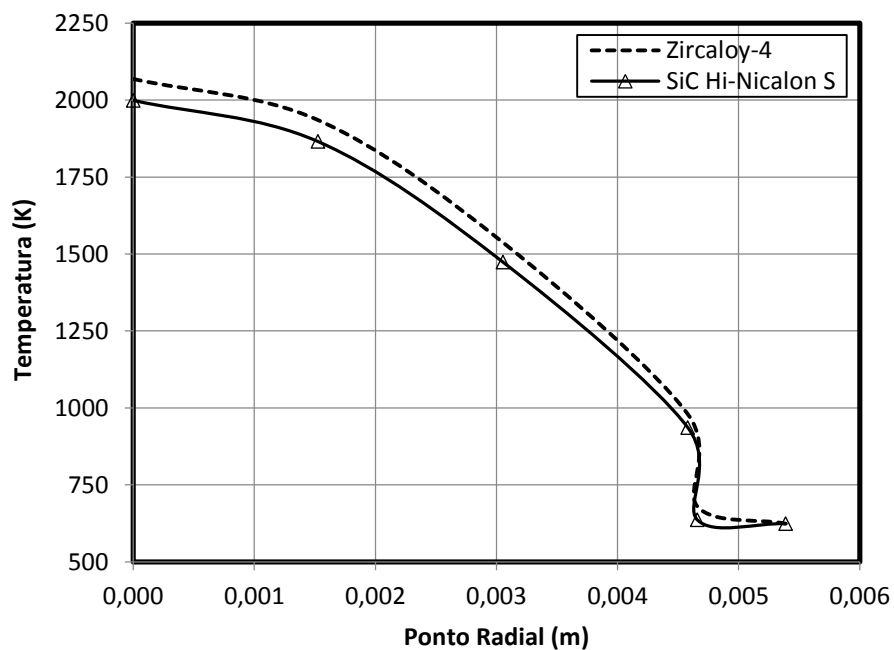
Temperatura (K)	Condutividade Térmica (W/mK)	Produto da densidade e calor específico a pressão constante e densidade ( $\rho.c_p$ ) (J/m <sup>3</sup> K x 10 <sup>6</sup> )
292,3	169,88	3,16
335,0	142,41	3,29
395,6	118,55	3,38
477,6	98,31	3,50
566,7	84,58	3,63
659,4	73,73	3,72
773,5	62,89	3,78
887,5	54,94	3,88
1001,6	49,16	3,91
1105,0	43,37	3,97
1208,3	38,31	4,00
1322,4	34,70	4,03
1415,0	32,53	4,06
1529,1	29,64	4,09
1650,3	26,75	4,12
1753,7	25,30	4,15

A seguir serão apresentados os resultados obtidos usando os dois revestimentos, com suas respectivas propriedades e as especificações do núcleo conforme descritas no FSAR de Angra II (ELETROBRAS, 2013).

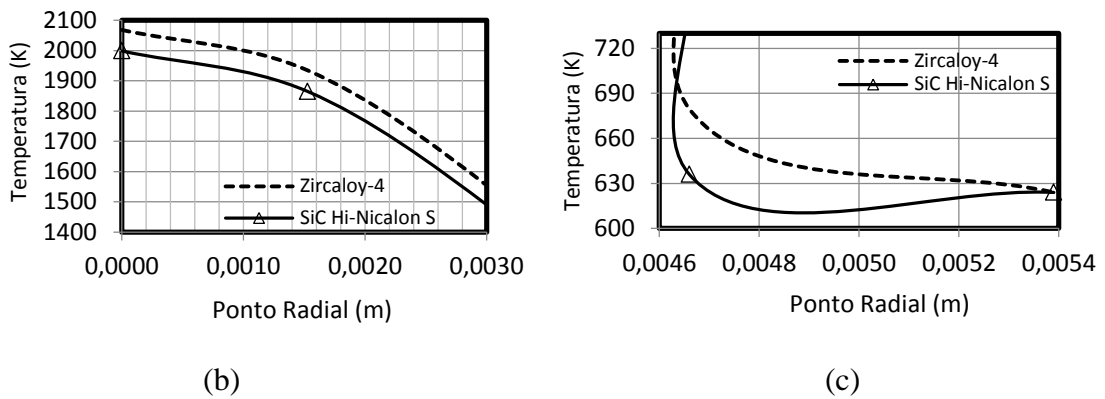
#### 4.5.1. Comparação da temperatura da vareta combustível do núcleo do reator de Angra II com os dois revestimentos

Como é possível verificar na Figura 11, mudando o material de revestimento, há mudanças nas temperaturas do combustível como era esperado. A Figura 11 (b) e (c) mostra, em detalhes, a distribuição de temperatura em diferentes pontos do comprimento radial. O comprimento inicial, apontado como valor zero, representa o centro da estrutura de calor. As temperaturas radiais foram tomadas na metade da altura axial dos conjuntos centrais.

Os resultados obtidos das temperaturas radiais ratificam a melhor condutividade térmica do carbetto de silício (SiC) em relação ao Zircaloy, usando o código RELAP5. Isto mostra que sendo o SiC um melhor condutor térmico, ele retira mais rapidamente o calor gerado na fissão do combustível e transfere para o moderador. Desse modo, observa-se que a temperatura média do combustível com o revestimento SiC reforçado com as fibras de Hi-Nicalon tipo S é menor que a temperatura média do combustível quando se usa o Zircaloy.

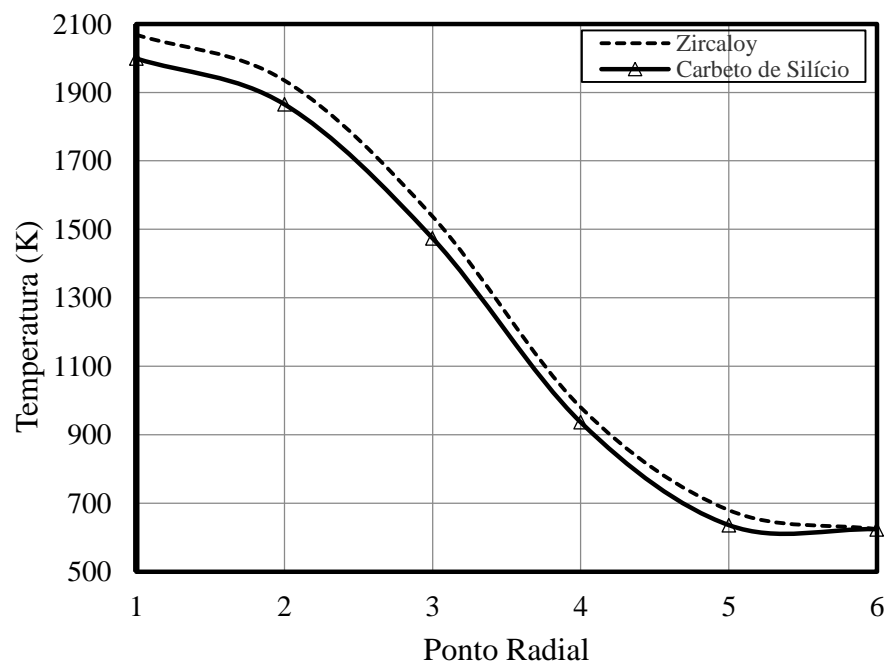


(a)



**Figura 11. (a) Temperatura radial a meia altura do EC para os dois revestimentos, (b) e (c) temperaturas radiais em diferentes pontos.**

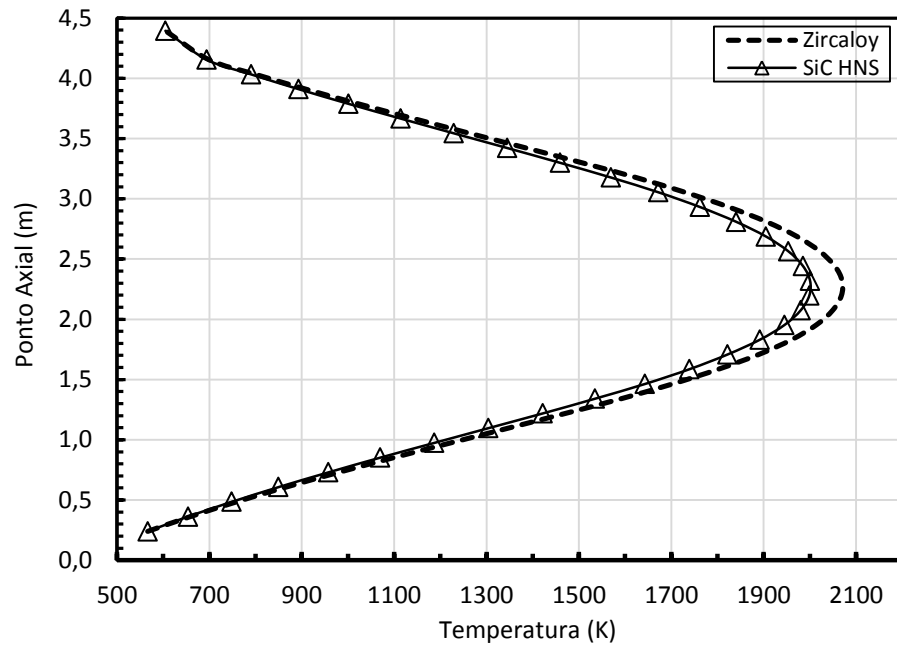
Na Figura 12, é mostrada a distribuição radial da temperatura no núcleo do combustível à meia altura em 6 pontos como indicado na Figura 10 (b). Analisando as Figuras 11 e 12, é possível concluir que a utilização de diferentes tipos de materiais de revestimento tem um efeito direto na temperatura do combustível.



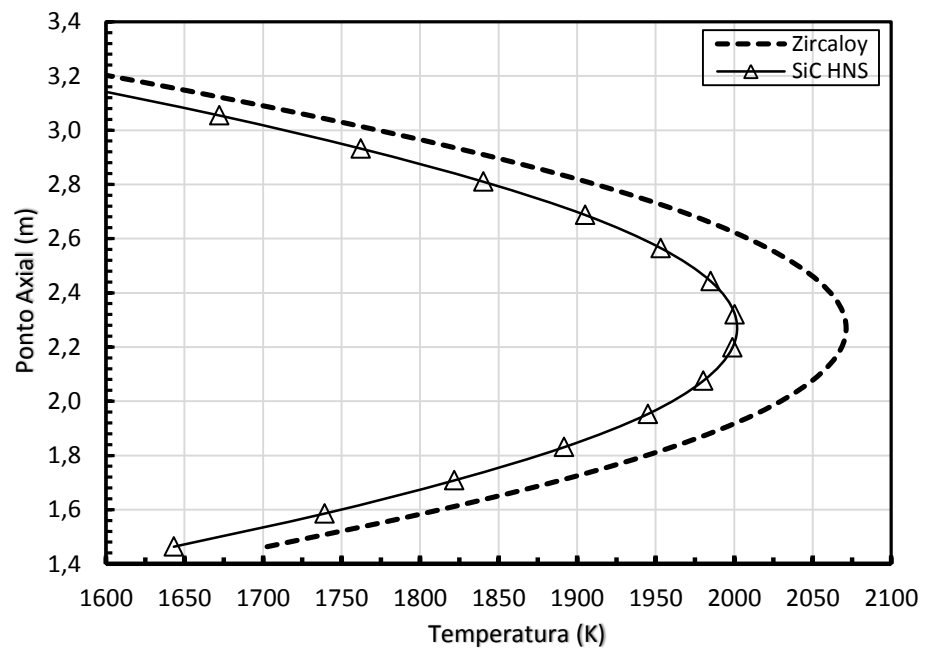
**Figura 12. As temperaturas radiais em diferentes pontos do combustível do núcleo à meia altura.**

A Figura 13 mostra a comparação da temperatura nos dois revestimentos, através da distribuição axial do EC no centro do núcleo do reator. A distribuição de potência

radial foi considerada a partir dos dados FSAR, início do ciclo 1, a plena potência. A Figura 14 mostra a região central ampliada.



**Figura 13. Comparação da temperatura do EC em uma distribuição axial localizada no centro do núcleo do reator.**



**Figura 14. Região de pico de temperatura no EC em uma distribuição axial localizada no centro do núcleo do reator.**



As curvas nas Figuras 11, 12, 13 e 14, tem o mesmo comportamento na transferência de calor, os diferentes valores apresentados são devidos apenas aos diferentes tipos de revestimento.

De acordo com FSAR (ELETROBRÁS, 2013), a temperatura média de operação do combustível revestido com Zircaloy é 873 K. Como as Figuras 11 e 12 demonstraram, a temperatura média do combustível revestido com SiC HNS é cerca de 3,78% menor. Valores próximos a este, foram obtidos em outros exercícios usando o código RELAP5, em outras regiões do núcleo de Angra II e também no núcleo de Angra I.

Então, aplicando esse percentual ao valor da temperatura média do combustível revestido com o Zircaloy, foi encontrada uma diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) igual a 33 K. Sendo assim, a temperatura média de operação do combustível revestido com o SiC HNS é 840 K, ou seja, 33 K menor que o valor padrão de 873 K.

Após a confirmação da diferença de temperatura do combustível entre os revestimentos usados, todas as análises seguintes foram feitas com a devida correção, ou seja, a temperatura média de operação adotada para o combustível revestido com o SiC HNS foi 840 K e quando o revestimento é o Zircaloy foi mantido o mesmo valor de 873 K.

Depois das análises térmicas e a constatação da diferença da temperatura média de operação do combustível nuclear com os dois revestimentos, o ECB revestido com Zircaloy e com SiC HNS, foi simulado sem varetas de veneno queimável e com variações de varetas de veneno queimável. Foram avaliados os parâmetros neutrônicos, fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) e coeficiente de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{combustível}$ ), através dos módulos *CSAS* e *TRITON-KENO* do sistema de código *SCALE 6.0*.

Em virtude do interesse em usar o SiC HNS como revestimento dos combustíveis do núcleo do reator de Angra II e face aos resultados alcançados com o estudo sobre a transferência de calor usando o *RELAP5*, foi utilizado o *FSAR* de Angra II (ELETROBRÁS, 2013) como referência no uso das quantidades e composições das varetas de veneno queimável no ECB. Desse modo, foi possível verificar o seu comportamento no estado estacionário em *Begin Of Life (BOL)* e com a evolução do combustível.

#### **4.6. Análises do ECB sem e com variações de varetas de veneno queimável e com os dois revestimentos**

Além da simulação do ECB sem varetas de veneno queimável (SVVQ), foi realizado também, a simulação do ECB com a substituição de algumas varetas de  $\text{UO}_2$ , por varetas de  $\text{UO}_2$  com veneno queimável. Primeiramente, o estudo foi realizado com 8 varetas de veneno queimável (8 VVQ) e em seguida com 12 VVQ. A composição das varetas com veneno queimável é  $\text{UO}_2 + \text{Gd}_2\text{O}_3$ , sendo o urânio (U) natural e 7,0% de gadolínio (Gd), conforme FSAR de Angra II.

##### **4.6.1. ECB com os dois revestimentos no estado estacionário em BOL**

Em virtude da inexistência de um estudo com variações de temperaturas, o ECB com os dois revestimentos e com variações de varetas de veneno queimável, será analisado no estado estacionário em *Begin Of Life (BOL)* com as temperaturas fixas para o revestimento de 673 K e, para o moderador, de 573 K. Além disso, com variação da temperatura do combustível a partir da temperatura de 300 K (27 °C), passando pela temperatura média de operação do combustível revestido com Zircaloy (873 K) e o SiC HNS (840 K) até à temperatura de 1073 K (800 °C).

Com esse intervalo de variações nas temperaturas médias do combustível, acredita-se alcançar resultados suficientes para avaliar o fator de multiplicação infinito e o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível, aumentando desse modo a confiança na real possibilidade da substituição do atual revestimento dos combustíveis dos reatores *PWR*, pelo SiC HNS.

A Figura 7, citada anteriormente, apresentou o ECB com 24 tubos guias, 01 tubo guia central e sem varetas de veneno queimável.

As Figuras 15 e 16 ilustram o elemento combustível com 24 tubos guias, 01 tubo guia central, 8 e 12 varetas de veneno queimável, respectivamente.

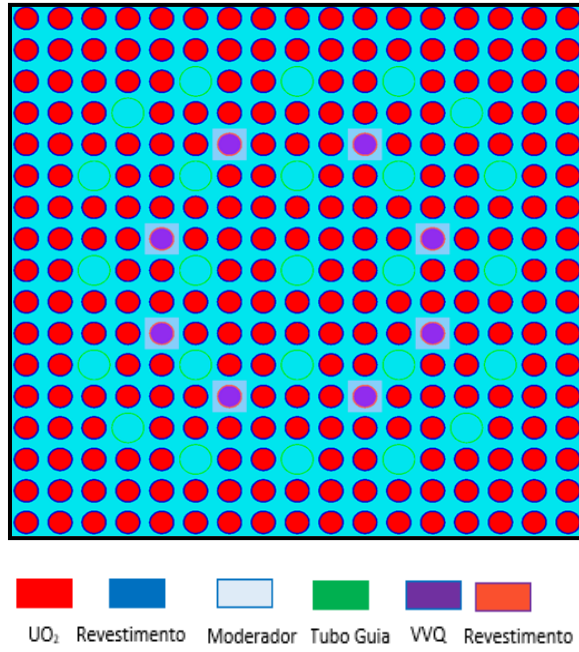


Figura 15. Elemento combustível com 8 varetas de veneno queimável.

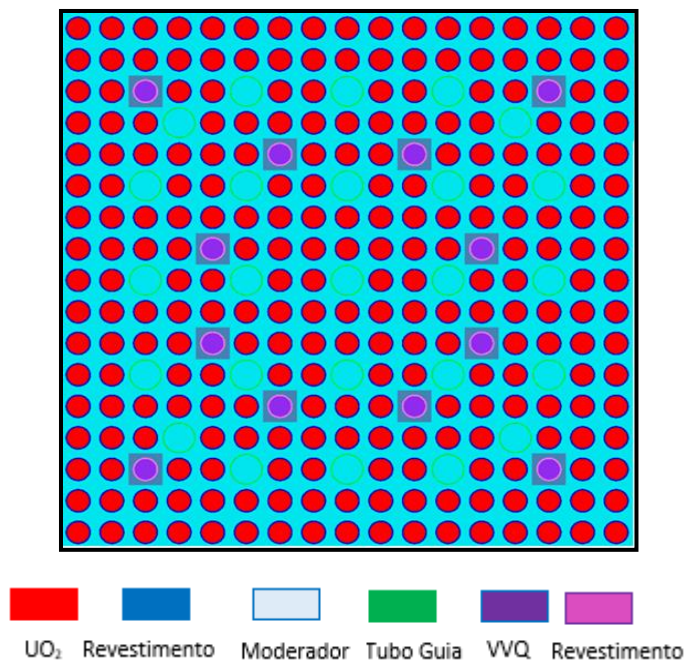


Figura 16. Elemento combustível com 12 varetas de veneno queimável.

Para o cálculo de criticalidade no estado estacionário, no módulo CSAS6 foram considerados 10000 partículas em 243 gerações e a biblioteca 238 grupos colapsada da ENDF/BVII.0 e os seguintes parâmetros foram analisados:

- a) fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) com as variações da temperatura do combustível;
- b) coeficiente de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{combustível}$ ).

Para calcular o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{combustível}$ ) foi usada a equação (8), que, de acordo com Duderstadt & Hamilton (1976), o coeficiente de reatividade de temperatura está em ( $K^{-1}$ ), a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) está na unidade kelvin (K),  $k_2$  é o fator de multiplicação infinito para diferentes temperaturas e  $k_1$  é o fator de multiplicação infinito às temperaturas padrões médias de operação do combustível (873 K e 840 K), respectivamente para o Zircaloy e o SiC HNS.

$$\alpha_{Fuel} = \left[ \frac{k_2 - k_1}{k_2 \cdot k_1} \right] \cdot \frac{1}{\Delta T_{Fuel}} \times 10^5 K^{-1} \quad (8)$$

Para comparar a diferença em percentual dos valores do  $k_{inf}$  nos dois revestimentos durante as variações nas temperaturas do combustível, foi usada a equação (5).

No item seguinte são apresentados tabelas e gráficos do  $k_{inf}$  e do ( $\alpha_{combustível}$ ) com as variações da temperatura do combustível e da quantidade de varetas de veneno queimável e as respectivas análises dos resultados alcançados.

#### **4.6.2. Resultados**

Nas Tabelas 10 a 15 são apresentados os valores do  $k_{inf}$  com os respectivos desvios padrão ( $\sigma$ ) do código para os dois tipos de revestimentos, sem varetas de veneno queimável, com 8 e 12 varetas de veneno queimável (VVQ), com as diversas variações de temperaturas do combustível no estado estacionário em *BOL*, com o combustível enriquecido a 4,0%, conforme (OECD, 2006), desde a temperatura de 300 K, passando pelas temperaturas médias de operações do combustível (873 K para o

Zircaloy e 840 K para o SiC HNS), além dos coeficientes de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{combustível}$ ).

Em todas as diferentes temperaturas avaliadas, os valores do  $k_{inf}$  com o SiC HNS são sempre maiores do que com o Zircaloy. Tão importante quanto esse fato, é que todos os valores do coeficiente de reatividade de temperatura do combustível para ambos os revestimentos são negativos, requisito importante para a segurança das instalações nucleares.

**Tabela 10. Zircaloy sem varetas de veneno queimável**

Módulo CSAS6 – 10000 partículas					
Zircaloy sem Varetas de Veneno Queimável (SVVQ)					
Temperaturas (K)			$k_{inf}$	Desvio ( $\sigma$ )	$\alpha_{combustível}$ ( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
Revestimento	Moderador	Combustível			
673	573	873*	1,35188	0,00044	
		300	1,37240	0,00038	-1,93021
		400	1,36686	0,00050	-1,71391
		500	1,36401	0,00054	-1,76358
		600	1,36064	0,00040	-1,74446
		700	1,35743	0,00044	-1,74820
		800	1,35630	0,00037	-1,28759
		840	1,35247	0,00040	-0,97785
		900	1,35107	0,00043	-1,64250
		923	1,35076	0,00035	-1,22668
		1000	1,34793	0,00038	-1,70682
		1073	1,34727	0,00041	-1,26555

\*Referência

Tabela 11. SiC HNS sem varetas de veneno queimável

Módulo CSAS6 – 10000 partículas					
SiC HNS - Sem Varetas de Veneno Queimável (SVVQ)					
Temperaturas (K)			k <sub>inf</sub>	Desvio (σ)	α <sub>combustível</sub> (10 <sup>5</sup> .K <sup>-1</sup> )
Revestimento	Moderador	Combustível			
673	573	840*	1,35701	0,00039	
		300	1,37779	0,00037	-2,05819
		400	1,37193	0,00041	-1,82138
		500	1,36759	0,00039	-1,67675
		600	1,36503	0,00042	-1,80401
		700	1,36136	0,00039	-1,68192
		800	1,35827	0,00038	-1,70900
		873	1,35652	0,00037	-0,80663
		890	1,35497	0,00045	-2,21895
		900	1,35624	0,00034	-0,69730
		1000	1,35208	0,00041	-1,67935
		1073	1,35076	0,00037	-1,46340

\*Referência

Tabela 12. Zircaloy com 8 varetas de veneno queimável

Módulo CSAS6 com 7,0% de Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e 10000 partículas					
Zircaloy com 8 Varetas de Veneno Queimável (8 VVQ)					
Temperaturas (K)			k <sub>inf</sub>	Desvio (σ)	α <sub>combustível</sub> (10 <sup>5</sup> .K <sup>-1</sup> )
Revestimento	Moderador	Combustível			
673	573	873*	1,25423	0,00036	
		300	1,27280	0,00036	-2,03011
		400	1,26824	0,00041	-1,86208
		500	1,26475	0,00045	-1,77797
		600	1,26165	0,00039	-1,71761
		700	1,25848	0,00041	-1,55639
		800	1,25529	0,00038	-0,92228
		840	1,25475	0,00043	-1,00128
		900	1,25262	0,00041	-3,79547
		923	1,25097	0,00038	-4,15550
		1000	1,24923	0,00040	-2,51274
		1073	1,24819	0,00039	-1,92907

\*Referência

**Tabela 13. Zircaloy com 12 varetas de veneno queimável**

Módulo CSAS6 com 7,0% de Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e 10000 partículas					
Zircaloy com 12 Varetas de Veneno Queimável (12 VVQ)					
Temperaturas (K)			k <sub>inf</sub>	Desvio (σ)	α <sub>combustível</sub> (10 <sup>5</sup> .K <sup>-1</sup> )
Revestimento	Moderador	Combustível			
673	573	873*	1,20495	0,00039	
		300	1,22399	0,00038	-2,25302
		400	1,21912	0,00044	-2,03936
		500	1,21506	0,00040	-1,85129
		600	1,21273	0,00041	-1,95022
		700	1,20943	0,00038	-1,77698
		800	1,20664	0,00037	-1,59227
		840	1,20545	0,00050	-1,04313
		900	1,20430	0,00045	-1,65900
		923	1,20341	0,00039	-2,12407
		1000	1,20087	0,00051	-2,22020
		1073	1,19985	0,00035	-1,76378

\*Referência

**Tabela 14. SiC HNS com 8 varetas de veneno queimável**

Módulo CSAS6 com 7,0% de Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e 10000 partículas					
SiC HNS com 8 Varetas de Veneno Queimável (8 VVQ)					
Temperaturas (K)			k <sub>inf</sub>	Desvio (σ)	α <sub>combustível</sub> (10 <sup>5</sup> .K <sup>-1</sup> )
Revestimento	Moderador	Combustível			
673	573	840*	1,25884	0,00040	
		300	1,27778	0,00048	-2,18052
		400	1,27298	0,00047	-2,00542
		500	1,26875	0,00046	-1,82494
		600	1,26689	0,00042	-2,10317
		700	1,26228	0,00040	-1,54634
		800	1,25963	0,00038	-1,24553
		873	1,25758	0,00037	-2,41185
		890	1,25743	0,00043	-1,78154
		900	1,25637	0,00038	-2,60290
		1000	1,25353	0,00039	-2,10315
		1073	1,25243	0,00038	-1,74493

\*Referência

Tabela 15. SiC HNS com 12 varetas de veneno queimável

Módulo CSAS6 com 7,0% de Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e 10000 partículas					
SiC HNS com 12 Varetas de Veneno Queimável (12 VVQ)					
Temperaturas (K)			k <sub>inf</sub>	Desvio (σ)	α <sub>combustível</sub> (10 <sup>5</sup> .K <sup>-1</sup> )
Revestimento	Moderador	Combustível			
673	573	840*	1,20998	0,00045	
		300	1,22876	0,00042	-2,33914
		400	1,22331	0,00038	-2,04674
		500	1,21979	0,00040	-1,95491
		600	1,21791	0,00054	-2,24217
		700	1,21343	0,00043	-1,67841
		800	1,21093	0,00040	-1,62094
		873	1,20860	0,00044	-2,85959
		890	1,20822	0,00038	-2,40779
		900	1,20855	0,00040	-1,62983
		1000	1,20536	0,00039	-1,97983
		1073	1,20358	0,00042	-1,88613

\*Referência

As Figuras 17, 18 e 19 mostram o comportamento do k<sub>inf</sub> em função da temperatura do elemento combustível com os revestimentos, Zircaloy e SiC HNS (proposto), sem varetas de veneno queimável, com 8 e com 12 varetas de veneno queimável.

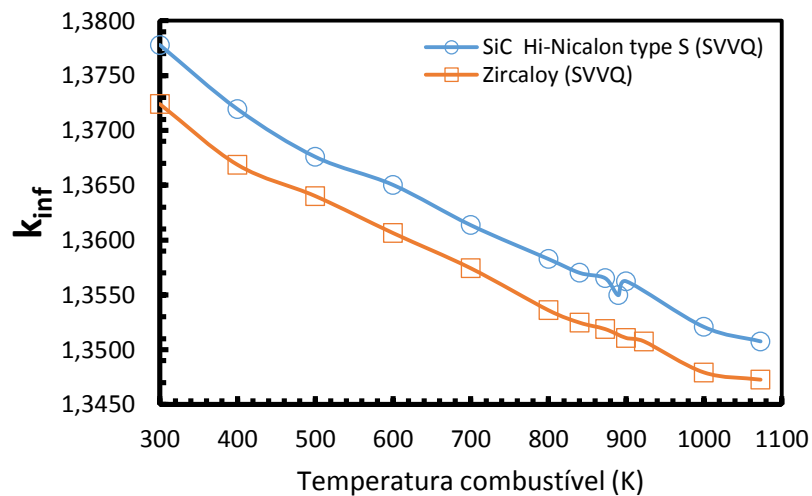
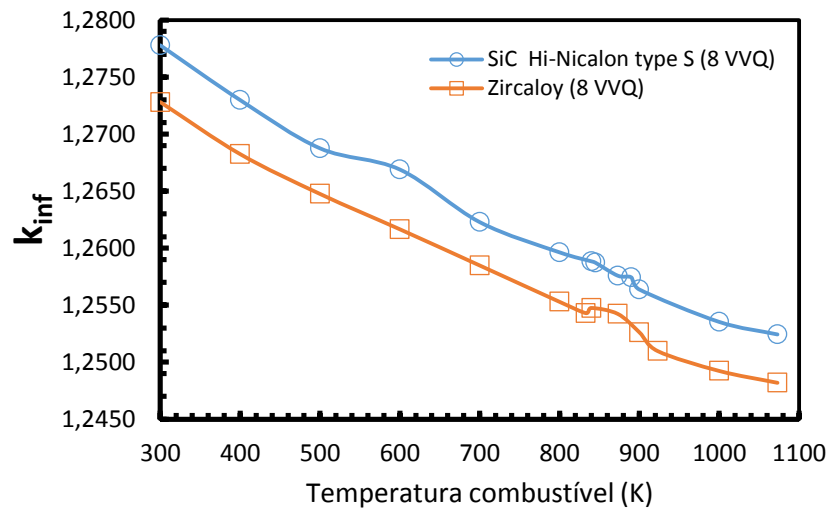
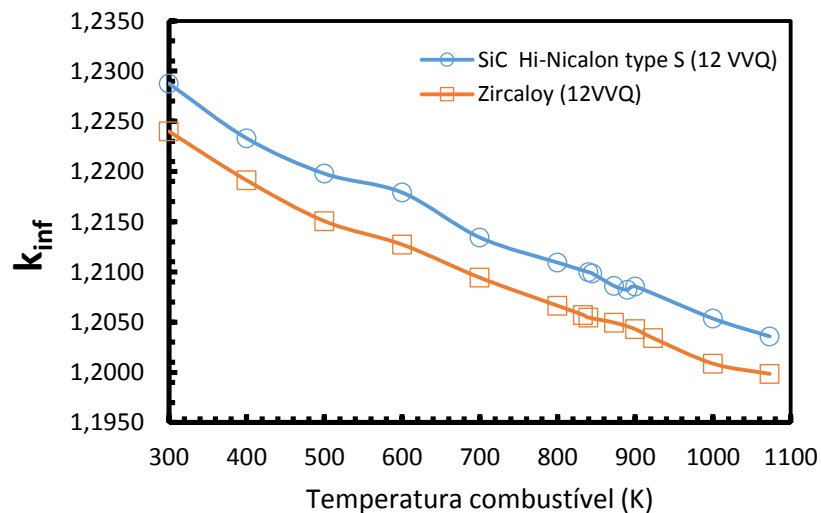


Figura 17. Fator de multiplicação infinito no estado estacionário em BOL com variações de temperaturas, dois tipos de revestimentos e sem varetas de veneno queimável (SVVQ).





**Figura 18.** Fator de multiplicação infinito com variações de temperatura no estado estacionário em BOL com os dois revestimentos e uso de 8 varetas de veneno queimável (8 VVQ).



**Figura 19.** Fator de multiplicação infinito com variações de temperatura no estado estacionário em BOL com os dois revestimentos e uso de 12 varetas de veneno queimável (12 VVQ).

Apesar das variações nas temperaturas, da ausência e/ou da presença e quantidade de varetas de veneno queimável (VVQ) no estado estacionário em *BOL*, se observa o mesmo perfil gráfico, embora o  $k_{inf}$  do elemento combustível usando o SiC HNS seja sempre maior, chegando, em alguns casos até a 0,4%, ratificando o que já havia sido demonstrado na validação do modelo do ECB. Importante salientar que, apesar da presença das varetas de veneno queimável o perfil gráfico do combustível revestido

com SiC HNS (proposto), é semelhante ao combustível com o revestimento convencional.

Para gerar os gráficos apresentados nas Figuras 20 e 21, foi necessário gerar a seção de choque no NJOY99.364 para cada nuclídeo na temperatura desejada. No caso do SiC HNS, foram geradas 4 seções choques na temperatura de 840 K, sendo três para os isótopos do silício ( $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ) e uma seção de choque para o carbono ( $^{12}\text{C}$ ). No caso do Zircaloy, foram geradas 24 seções de choques na temperatura de 873 K, destas, 5 para os isótopos do zircônio ( $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{91}\text{Zr}$ ,  $^{92}\text{Zr}$ ,  $^{94}\text{Zr}$  e  $^{96}\text{Zr}$ ), 5 para os isótopos do titânio ( $^{46}\text{Ti}$ ,  $^{47}\text{Ti}$ ,  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{49}\text{Ti}$  e  $^{50}\text{Ti}$ ), 4 para os isótopos do cromo ( $^{50}\text{Cr}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{53}\text{Cr}$  e  $^{54}\text{Cr}$ ), 4 para os isótopos do ferro ( $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Fe}$  e  $^{58}\text{Fe}$ ) e finalmente, 6 seções de choques para os isótopos do háfnio ( $^{174}\text{Hf}$ ,  $^{176}\text{Hf}$ ,  $^{177}\text{Hf}$ ,  $^{178}\text{Hf}$ ,  $^{179}\text{Hf}$  e  $^{180}\text{Hf}$ ). Então, elas foram agrupadas como material pelo VISED do MCNP nas suas respectivas proporções.

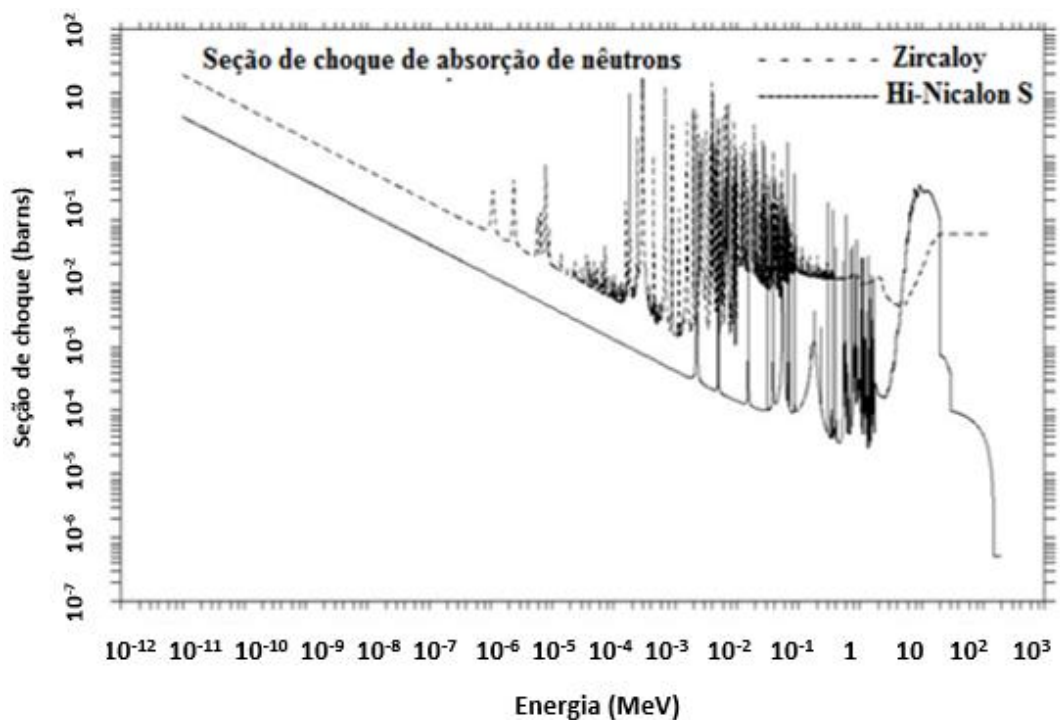


Figura 20. Seção de choque microscópica de absorção de nêutrons do Zircaloy e do SiC HNS, através da biblioteca neutrônica ENDF 7.1.

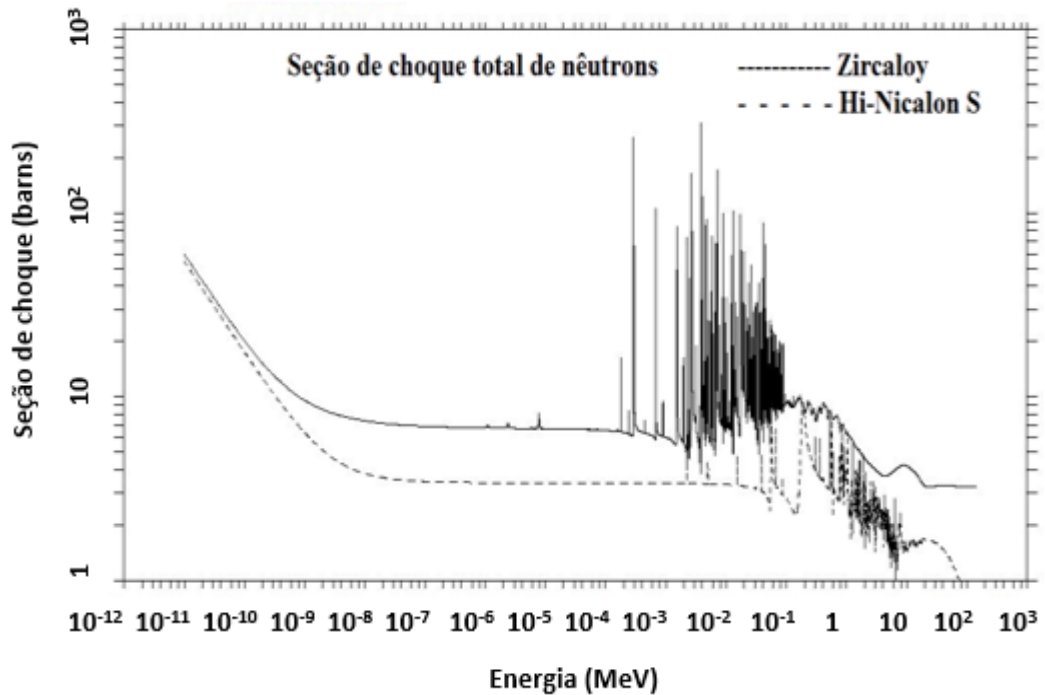


Figura 21. Seção de choque microscópica total de nêutrons do Zircaloy e SiC HNS, através da biblioteca neutrônica ENDF 7.1.

Os gráficos da Figura 20 são lineares e decrescentes até cerca de  $10^{-6}$  MeV para o Zircaloy e  $10^{-2}$  MeV para o SiC HNS. É evidente que o Zircaloy tem uma seção de choque de absorção muito mais elevada do que o SiC HNS, explicando assim o menor fator de multiplicação infinito para o combustível revestido com o Zircaloy.

Então, após a análise do ECB com os dois revestimentos, com as variações de varetas de veneno queimável e da temperatura do combustível no estado estacionário em *BOL* e os bons resultados alcançados, resolveu-se submeter o ECB às condições de operação, analisando-o durante a evolução do combustível.

#### 4.6.3. ECB com os dois revestimentos durante a evolução do combustível

Para a análise do ECB com os revestimentos, convencional e proposto, durante a evolução do combustível foi usado o módulo *TRITON-KENO VI* do *SCALE 6.0* (DeHart, 2009).

Com a intenção de reduzir o tempo computacional e sem prejuízo da qualidade dos resultados, foram usadas 5000 partículas e 1100 gerações, a biblioteca de seções de

choque de 238 grupos colapsada a partir da ENDF/BVII.0 e os parâmetros para a evolução do combustível conforme Tabela 16.

**Tabela 16. Parâmetros para evolução do combustível (OECD, 2006)**

Material	Temperatura do Combustível	Temperatura do Revestimento	Temperatura do Moderador	Densidade Específica potência	Tempo (dias)	Potência GWd/MTU	<sup>b</sup> Varetas Veneno Queimável
Zircaloy	873 K	673 K	573 K	38 W/gU	789,5	30,0	0 8 12
SiC HNS <sup>a</sup>	840 K <sup>a</sup>						

<sup>a</sup>Valor alcançado com a correção da temperatura via código RELAP. <sup>b</sup>Acrescentado em relação ao documento referência (OECD, 2006).

A análise do ECB foi feita quanto ao:

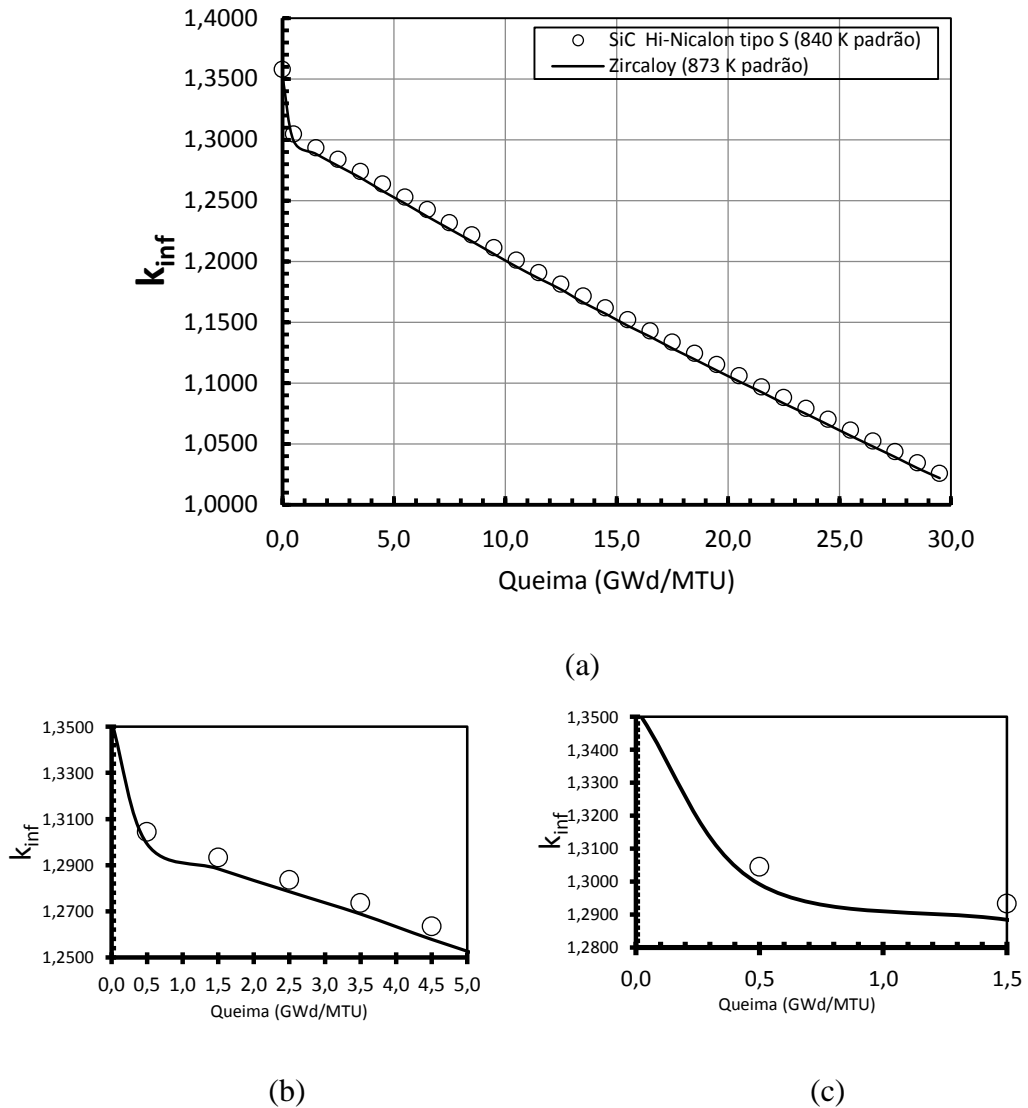
- fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) com as variações de varetas de veneno queimável;
- coeficiente de reatividade de temperatura do combustível, quando lhe for dado um acréscimo  $\Delta T$  de 50 K às temperaturas médias de operação do combustível com os respectivos revestimentos Zircaloy e SiC HNS.

Os resultados foram apresentados através de gráficos do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) e coeficiente de reatividade de temperatura de combustível ( $\alpha_{combustível}$ ).

#### **4.6.4. Resultados**

Nas Figuras 22 a 24 são mostradas a evolução do combustível ao longo da queima, usando os dois revestimentos sem varetas de veneno queimável, com 08 e 12 varetas de veneno queimável, respectivamente. Foram consideradas as temperaturas padrões médias do combustível, 873 K e 840 K, respectivamente para o Zircaloy e SiC HNS. Em todas as Figuras, são observados os mesmos comportamentos do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ), cujo valor é sempre maior, aproximadamente 0,4% para o ECB usando o SiC HNS. A ordem de grandeza do desvio padrão ( $\sigma$ ) do código de todos os cálculos realizados é  $10^{-4}$ .

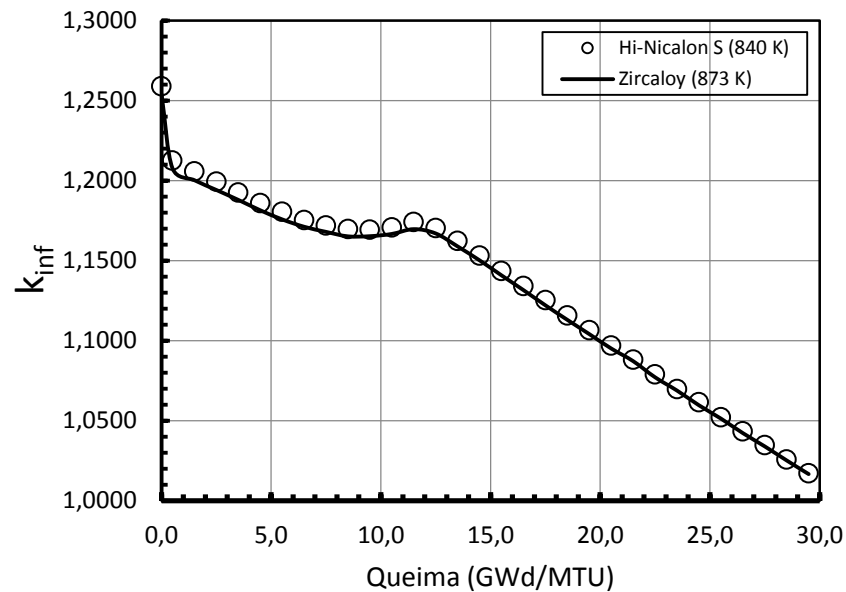
Na Figura 22, é mostrado o valor  $k_{inf}$  para ambos os revestimentos, sem varetas de veneno queimável, às temperaturas de 840 K para o SiC HNS e 873 K para Zircaloy, cujo valor é sempre ligeiramente maior para o SiC HNS durante todos os períodos da queima. A Figura 22 (b) e (c) evidencia o comportamento do  $k_{inf}$  em intervalos menores de queima.



**Figura 22.** (a) Fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) durante a queima usando o SiC HNS e o Zircaloy sem varetas de veneno queimável (SVVQ), nas respectivas temperaturas médias padrões do combustível 840 K e 873 K; (b) e (c) apresenta o comportamento em intervalos menores de queima.

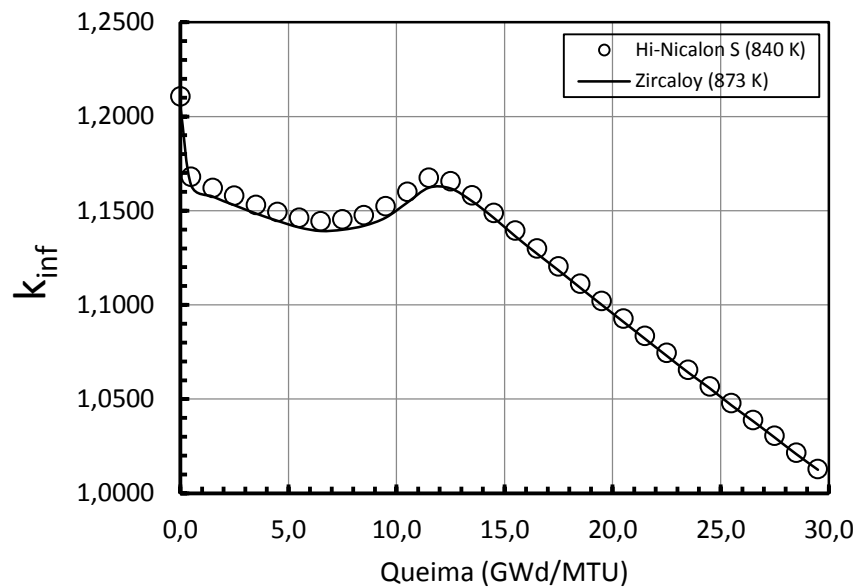
Na Figura 23, é mostrado o valor do  $k_{inf}$  para ambos os revestimentos com 8 VVQ, temperaturas de 840 K para o SiC HNS e 873 K para o Zircaloy. O valor do  $k_{inf}$  é sempre maior para SiC HNS durante todo o período de queima. Neste caso, é

importante notar que o valor inicial do  $k_{inf}$  é menor do que o  $k_{inf}$  inicial da Figura 22, devido à presença das varetas de veneno queimável. Vale ressaltar que o comportamento do  $k_{inf}$  quando o combustível é revestido com SiC HNS é idêntico quando é revestido com o Zircaloy (revestimento convencional).



**Figura 23.** Fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) durante a queima usando o SiC HNS e o Zircaloy, ambos com 8 varetas de veneno queimável (8 VVQ) e as respectivas temperaturas médias padrões do combustível 840 K e 873 K.

Na Figura 24, são mostrados os valores do  $k_{inf}$  para os dois revestimentos com 12 VVQ, temperaturas de 840 K para SiC HNS e 873 K para Zircaloy. O valor do  $k_{inf}$  continua maior para SiC HNS durante todo o período de queima. Novamente, observa-se que o valor inicial do  $k_{inf}$  é menor do que o  $k_{inf}$  inicial da Figura 23, devido à presença da maior quantidade de varetas de veneno queimável. No entanto, o perfil gráfico é o mesmo em ambos os revestimentos, confirmando que o SiC HNS não interfere na atuação do veneno queimável ao longo da queima.



**Figura 24. Valores de  $k_{inf}$  durante a queima usando o SiC HNS e o Zircaloy, ambos com 12 varetas de veneno queimável (12 VVQ) e as respectivas temperaturas médias padrões do combustível 840 K e 873 K.**

Após a análise do fator de multiplicação do elemento combustível com os dois revestimentos, sem varetas de veneno queimável, com 8 VVQ e 12 VVQ, com as respectivas temperaturas médias de operação do combustível, foi realizada uma elevação de 50 K nas temperaturas médias de operação do combustível revestido com cada revestimento a fim de estudar o comportamento do coeficiente de reatividade de temperatura do combustível  $\alpha_{combustível}$ .

As Figuras 25, 26 e 27 foram obtidas através da aplicação da Equação (8) e mostram o comportamento do  $\alpha_{combustível}$  nas três situações analisadas, elemento combustível sem a presença de varetas de veneno queimável, com 8 VVQ e com 12 VVQ, respectivamente.

A Figura 25 mostra o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível  $\alpha_{combustível}$  para os revestimentos, SiC HNS e Zircaloy, sem a presença de varetas de veneno queimável. Todos os valores do  $\alpha_{combustível}$  são negativos quando o ECB está revestido com o SiC HNS. Mas quando o ECB está revestido com o Zircaloy, a maioria dos valores são negativos, porém, no final do ciclo há um excesso de reatividade.

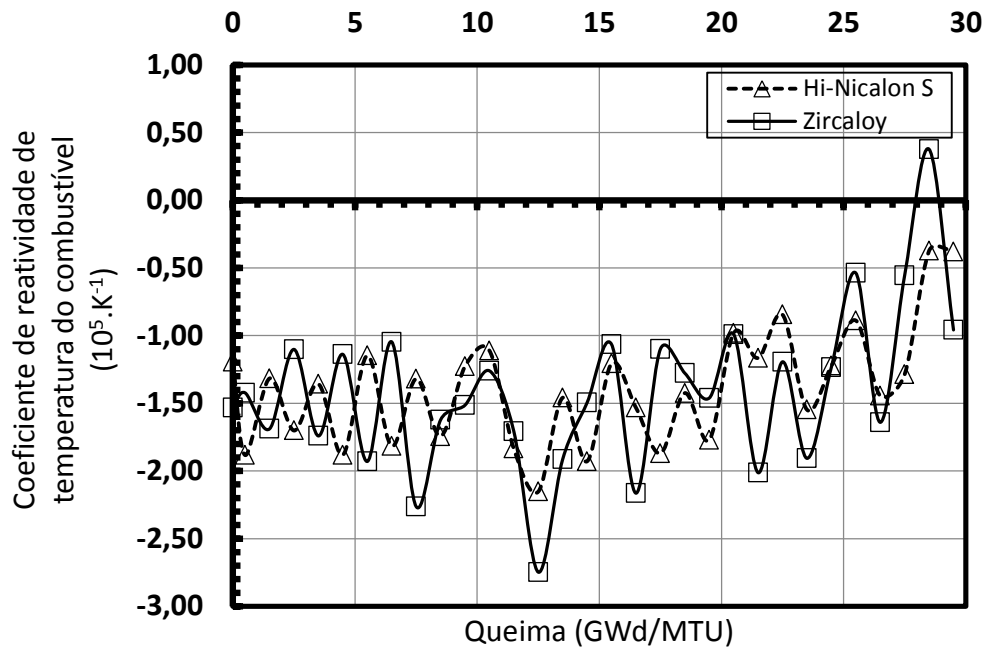


Figura 25. Valores de  $\alpha_{\text{combustível}}$  com o uso dos revestimentos SiC HNS e Zircaloy, sem varetas de veneno queimável, com variações de temperaturas de 50 K em relação às respectivas temperaturas de médias de operação 840 K e 873 K.

É importante ressaltar que os valores do  $\alpha_{\text{combustível}}$  serem negativos é bastante relevante e isto ocorreu durante toda a queima do combustível quando o ECB estava revestido com SiC HNS, mostrando assim a confiabilidade na possível utilização desse cerâmico como revestimento do combustível nuclear.

Na Figura 26, pode-se verificar todos os resultados negativos do  $\alpha_{\text{combustível}}$  quando o elemento combustível está revestido com o SiC HNS e com a ação de 8 VVQ. Quando a análise é realizada com o Zircaloy, os valores do  $\alpha_{\text{combustível}}$  também são negativos, exceto nas proximidades da queima 25 GWd/MTU, onde o coeficiente apresenta valor zero.



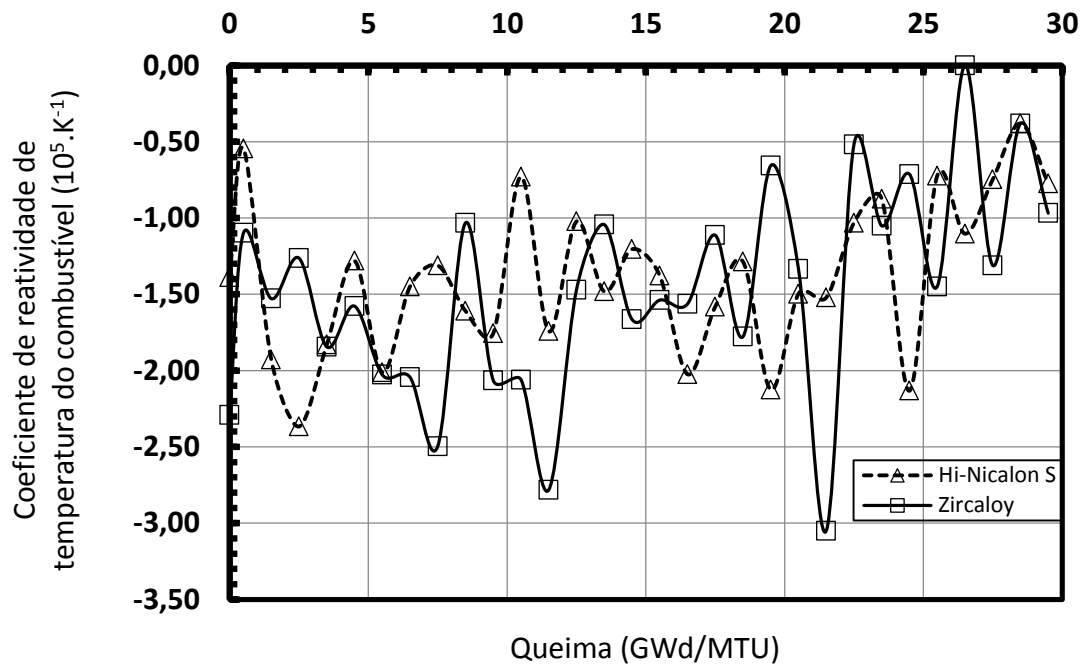
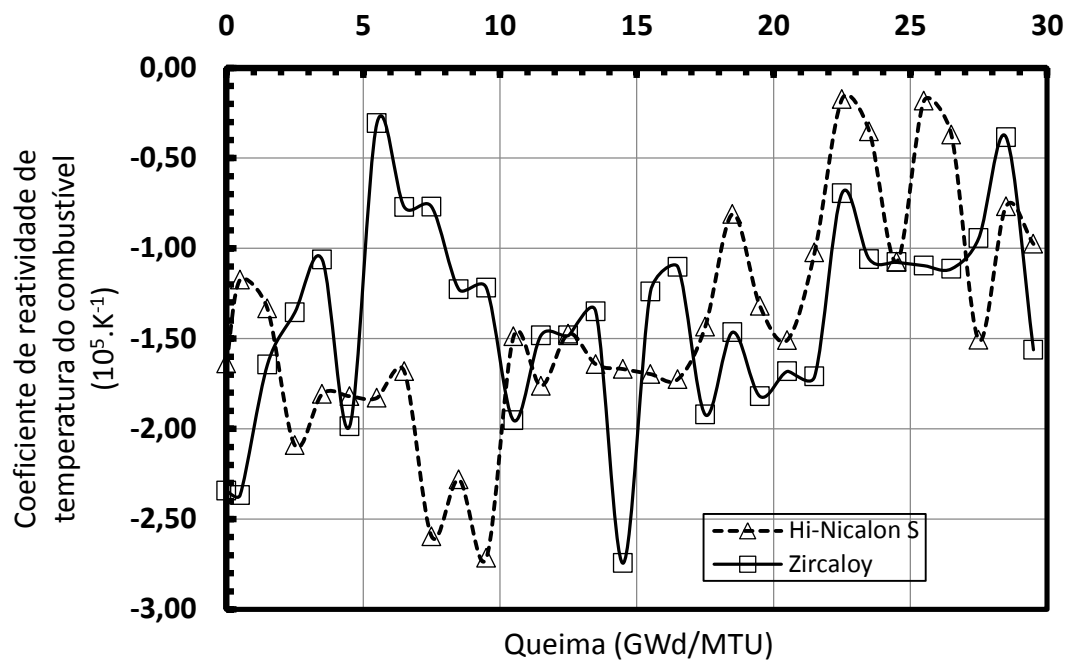


Figura 26. Valores do  $\alpha_{\text{combustível}}$  com o uso dos revestimentos SiC HNS e Zircaloy, com 8 varetas de veneno queimável, com variações de temperaturas de 50 K em relação às respectivas temperaturas de médias de operação 840K e 873K.

Na Figura 27, é mostrado o comportamento do coeficiente de reatividade de temperatura do combustível, nas situações analisadas, ou seja, elemento combustível com revestimentos de SiC HNS e Zircaloy, ambos os elementos com a ação de 12 VVQ. Nas duas situações, todos os valores em todos os períodos de queima apresentaram o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{\text{combustível}}$ ) negativos.



**Figura 27.** Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível com o uso dos revestimentos SiC HNS e Zircaloy, 12 varetas de veneno queimável, com variações de temperaturas de 50 K em relação às respectivas temperaturas de médias de operação 840 K e 873 K.

É importante ressaltar que o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível é um dos coeficientes fundamentais para a segurança das instalações nucleares. Como é visto neste estudo, todos os seus valores são negativos durante toda a queima, quando o ECB está revestido com o SiC HNS, o que é fundamental para que o reator possa se estabilizar no caso de excesso de reatividade. Caso contrário, a segurança do núcleo de um reator, dos trabalhadores e de toda a planta poderia ficar comprometida.

Quando os valores do coeficiente de reatividade de temperatura do combustível são negativos, ocorre a ampliação da ressonância e aumento da absorção de nêutrons térmicos, reduzindo assim o fluxo e evitando o aumento de potência de forma descontrolada.

Após o estudo do modelo do ECB com os revestimentos, Zircaloy (convencional) e SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (proposto), com a devida correção da temperatura do combustível quando revestido com SiC HNS, através do código RELAP5, com as variações de boro no moderador, com as variações das temperaturas do combustível e os bons resultados obtidos, metodologia similar será aplicada ao reator de Angra II.

## CAPÍTULO 5. APLICAÇÃO AO REATOR DE ANGRA II

A aplicação da metodologia ao reator de Angra II é feita inicialmente considerando um estudo de célula de combustível, sendo o estudo realizado para os diferentes enriquecimentos usados em Angra II. Nesta análise considerou o moderador sem boro e também com variações na quantidade de boro, além das variações de temperaturas e com potência zero e potência máxima, usando os módulos *CSAS*, *TRITON-KENO VI* e *TRITON-NEWT*.

Posteriormente, foi simulado o núcleo baseado no *FSAR* e com o uso do revestimento SiC HNS, onde foi analisado o fator de multiplicação efetivo ( $k_{eff}$ ), o coeficiente de reatividade de temperatura de combustível ( $\alpha_{combustível}$ ), quando é dado um acréscimo ( $\Delta T$ ) de 50 K às temperaturas médias de operações do combustível com o uso dos dois revestimentos, Zircaloy e o SiC HNS. Foi feita a análise da variação da quantidade de boro e do veneno queimável durante a evolução do combustível e ainda verificação se há alguma diferença na razão de conversão (C) do núcleo com o uso dos dois revestimentos.

Todos os dados de Angra II, tanto para o estudo de célula, quanto para a simulação do núcleo, estão baseados no documento FSAR de Angra II (ELETROBRÁS, 2013). Além de outras simulações que foram realizadas, considerando um enriquecimento maior que o encontrado no núcleo do reator, porém, apresentado no FSAR de Angra II.

### 5.1. Cálculo de Célula

De acordo com o documento *Final Safety Analysis Report* (FSAR) de Angra II (ELETROBRÁS, 2013), a célula de combustível nuclear do reator de Angra II possui a geometria mostrada na Figura 28, onde (a) é mostrada a vista de frente da vareta do combustível com o comprimento ativo de 391,6 cm, em (b) é mostrada as dimensões do reticulado (p), ( $R_c$ ) indica o raio do combustível cujo valor é 0,4583 cm. O *gap* que é composto de hélio (He), possui raio ( $R_g$ ) igual a 0,4659 cm e o raio do revestimento ( $R_r$ ) cujo o tamanho é 0,5385 cm.

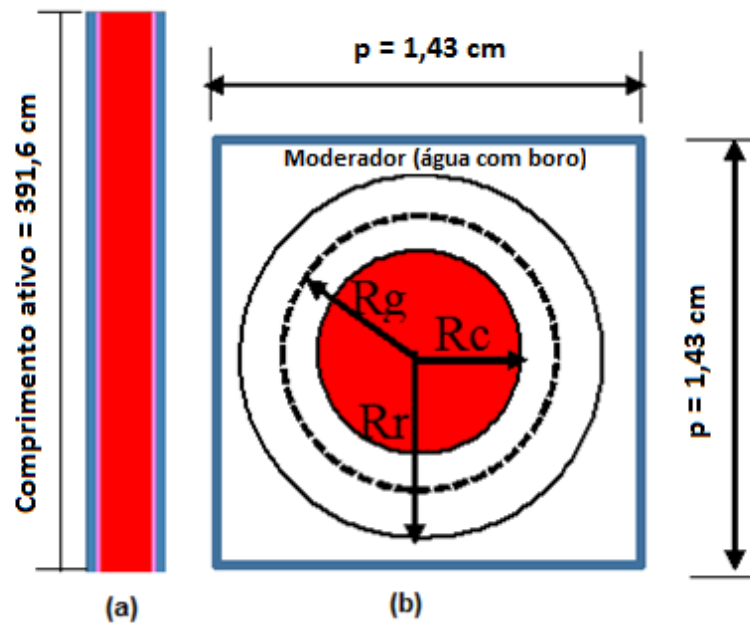


Figura 28. Célula do combustível do núcleo do reator de Angra II. Medidas fora de escala.

A célula do combustível foi analisada à *Begin Of Life (BOL)*, com os revestimentos, Zircaloy (convencional) e SiC HNS (proposto), com ela fria, isto é, temperatura de 293 K e potência zero, *Cold e Zero Power (CZP)*. A célula também foi analisada na condição quente, ou seja, temperatura média de operação do combustível revestido com Zircaloy (873 K) e demais temperaturas de acordo com o FSAR de Angra II (ELETROBRÁS, 2013). A temperatura média de operação do combustível revestido com SiC HNS (840 K), conforme correção de temperatura realizada via código RELAP5. Mantiveram-se as demais temperaturas em conformidade com o FSAR. A célula do combustível, ainda foi analisada em *Hot Full Power (HFP)*. Em todas as análises, foram usadas o módulo CSAS6, 10000 partículas e a biblioteca de seções de choque de 238 grupos colapsada a partir da ENDF/BVII.0.

Os valores do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) das células de combustíveis com os enriquecimentos e revestimentos, foram calculados e comparados durante a evolução do combustível. Nesta simulação, foram usados 500 ppm de boro, conforme consta em exercício apresentado no FSAR de Angra II (ELETROBRÁS, 2013). Os módulos usados foram, *TRITON-KENO VI* e o *TRITON-NEWT*, com o objetivo de assegurar que a análise está sendo feita de forma adequada.

### **5.1.1. Variações de boro e enriquecimentos no estado estacionário à BOL**

As células dos combustíveis analisadas possuem enriquecimentos de  $^{235}\text{U}$  em 1,9%, 2,5%, 3,2%, enriquecimentos presentes no núcleo do reator de Angra II. No entanto, foi analisado também o enriquecimento de  $^{235}\text{U}$  em 3,5% conforme consta em exercício apresentado no documento *FSAR* (ELETROBRÁS, 2013). Em todas as situações as células ficaram submetidas às variações de boro. Segundo o *FSAR* (ELETROBRÁS, 2013), o reator fica submetido a 500 ppm de boro, e para a recarga, 2200 ppm de boro. Como os valores de boro apresentados no *FSAR* estão em um intervalo muito grande, cada célula com o respectivo enriquecimento e revestimentos, Zircaloy e SiC HNS, foram analisadas, com 0, 500, 600, 700 e assim por diante até 2200 ppm de boro, no estado estacionário em *Begin Of Life (BOL)*.

A análise de cada célula de combustível é feita em relação ao fator de multiplicação infinito ( $k_{\text{inf}}$ ) e em relação ao coeficiente de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{\text{combustível}}$ ), cujos resultados são apresentados na próxima seção através de Tabelas.

### **5.1.2. Resultados**

Nas Tabelas 17 a 24, são mostradas os valores do fator de multiplicação infinito das células de combustíveis com os diferentes enriquecimentos, imersas no moderador com as variações de boro. Em todas as variações de boro em *BOL* com a célula fria ou quente, com *Zero Power e Full Power*, o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível permaneceu negativo, seja com o uso do Zircaloy ou com o uso do SiC HNS. O valor do  $\alpha_{\text{combustível}}$  aumenta, à medida que o enriquecimento aumenta, fato igualmente ocorrido na célula de combustível com os dois revestimentos.

O resultado negativo do  $\alpha_{\text{combustível}}$  é importante, pois corrobora com a possibilidade da substituição dos revestimentos dos combustíveis do reator *PWR*.

Tabela 17. Combustível enriquecido a 1,9% revestido com Zircaloy

Zircaloy – Begin Of Life (BOL)												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio ( $\sigma$ )	Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio ( $\sigma$ )	$\alpha_{combustível}$
Rev.	Mod.	Comb.	ppm			Rev.	Mod.	Comb.	ppm			( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
293	293	293	0	1,23730	0,00036	618	583	873	0	1,20534	0,00044	-3,69483
			500	1,15408	0,00038				500	1,12463	0,00036	-3,91212
			600	1,13878	0,00034				600	1,11045	0,00036	-3,86260
			700	1,12353	0,00032				700	1,09586	0,00033	-3,87473
			800	1,10991	0,00039				800	1,08218	0,00032	-3,98047
			900	1,09576	0,00033				900	1,06881	0,00032	-3,96748
			1000	1,08241	0,00032				1000	1,05619	0,00040	-3,95431
			1100	1,06934	0,00033				1100	1,04303	0,00034	-4,06706
			1200	1,05607	0,00033				1200	1,03054	0,00032	-4,04450
			1300	1,04380	0,00036				1300	1,01887	0,00033	-4,04165
			1400	1,03216	0,00031				1400	1,00768	0,00032	-4,05802
			1500	1,02092	0,00031				1500	0,99634	0,00041	-4,16634
			1600	1,00865	0,00032				1600	0,98499	0,00043	-4,10596
			1700	0,99785	0,00032				1700	0,97454	0,00033	-4,13285
			1800	0,98646	0,00027				1800	0,96354	0,00030	-4,15755
			1900	0,97582	0,00029				1900	0,95295	0,00031	-4,24032
2000	0,96579	0,00029	2000	0,94284	0,00032	-4,34544						
2100	0,95527	0,00030	2100	0,93388	0,00029	-4,13395						
2200	0,94559	0,00030	2200	0,92350	0,00031	-4,36142						

Tabela 18. Combustível enriquecido a 2,5% revestido com Zircaloy

Zircaloy – Begin Of Life (BOL)												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio ( $\sigma$ )	Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio ( $\sigma$ )	$\alpha_{combustível}$
Rev.	Mod.	Comb.	ppm			Rev.	Mod.	Comb.	ppm			( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
293	293	293	0	1,30654	0,00035	618	583	873	0	1,27532	0,00037	-3,23045
			500	1,23217	0,00040				500	1,20402	0,00041	-3,27149
			600	1,21840	0,00034				600	1,19059	0,00039	-3,30538
			700	1,20542	0,00034				700	1,17762	0,00045	-3,37655
			800	1,19312	0,00036				800	1,16602	0,00034	-3,35855
			900	1,18024	0,00033				900	1,15284	0,00033	-3,47203
			1000	1,16758	0,00034				1000	1,14143	0,00033	-3,38304
			1100	1,15617	0,00035				1100	1,13014	0,00034	-3,43473
			1200	1,14479	0,00037				1200	1,11898	0,00037	-3,47386
			1300	1,13294	0,00033				1300	1,10773	0,00032	-3,46341
			1400	1,12138	0,00035				1400	1,09712	0,00036	-3,39982
			1500	1,11052	0,00034				1500	1,08640	0,00033	-3,44694
			1600	1,09994	0,00033				1600	1,07620	0,00035	-3,45773
			1700	1,08845	0,00034				1700	1,06625	0,00033	-3,29805
			1800	1,07873	0,00034				1800	1,05653	0,00034	-3,35838
			1900	1,06906	0,00034				1900	1,04657	0,00033	-3,46570
2000	1,05883	0,00035	2000	1,03666	0,00030	-3,48237						
2100	1,04937	0,00031	2100	1,02776	0,00036	-3,45467						
2200	1,04014	0,00030	2200	1,01851	0,00039	-3,52023						

Tabela 19. Combustível enriquecido a 3,2% revestido com Zircaloy

Zircaloy – Begin Of Life (BOL)												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio ( $\sigma$ )	Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio ( $\sigma$ )	$\alpha_{combustível}$ ( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
Rev.	Mod.	Comb.	ppm			Rev.	Mod.	Comb.	ppm			
293	293	293	0	1,36016	0,00044	618	583	873	0	1,32847	0,00039	-3,02380
			500	1,29518	0,00037				500	1,26600	0,00038	-3,06827
			600	1,28284	0,00036				600	1,25520	0,00036	-2,95954
			700	1,27068	0,00039				700	1,24435	0,00036	-2,87107
			800	1,25973	0,00042				800	1,23267	0,00036	-3,00452
			900	1,24823	0,00038				900	1,22081	0,00037	-3,10239
			1000	1,23666	0,00035				1000	1,21038	0,00040	-3,02709
			1100	1,22577	0,00037				1100	1,20076	0,00039	-2,92968
			1200	1,21505	0,00040				1200	1,19004	0,00036	-2,98215
			1300	1,20464	0,00036				1300	1,18020	0,00040	-2,96388
			1400	1,19420	0,00035				1400	1,16963	0,00036	-3,03285
			1500	1,18445	0,00038				1500	1,16033	0,00036	-3,02588
			1600	1,17432	0,00037				1600	1,15067	0,00033	-3,01763
			1700	1,16528	0,00033				1700	1,14177	0,00039	-3,04660
			1800	1,15512	0,00034				1800	1,13227	0,00036	-3,01218
			1900	1,14594	0,00034				1900	1,12363	0,00041	-2,98735
2000	1,13732	0,00032	2000	1,11463	0,00033	-3,08598						
2100	1,12795	0,00037	2100	1,10623	0,00039	-3,00121						
2200	1,11824	0,00034	2200	1,09686	0,00034	-3,00534						

Tabela 20. Combustível enriquecido a 3,5% revestido com Zircaloy

Zircaloy – Begin Of Life (BOL)												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio ( $\sigma$ )	Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio ( $\sigma$ )	$\alpha_{combustível}$ ( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
Rev.	Mod.	Comb.	ppm			Rev.	Mod.	Comb.	ppm			
293	293	293	0	1,37744	0,00044	618	583	873	0	1,34661	0,00045	-2,86570
			500	1,31593	0,00033				500	1,28784	0,00042	-2,85778
			600	1,32378	0,00044				600	1,27565	0,00041	-4,91406
			700	1,29295	0,00037				700	1,26578	0,00043	-2,86234
			800	1,28134	0,00039				800	1,25449	0,00041	-2,87995
			900	1,27026	0,00036				900	1,24464	0,00037	-2,79393
			1000	1,25922	0,00035				1000	1,23383	0,00034	-2,81759
			1100	1,24995	0,00042				1100	1,22406	0,00036	-2,91749
			1200	1,23837	0,00039				1200	1,21450	0,00038	-2,73638
			1300	1,22859	0,00042				1300	1,20519	0,00038	-2,72474
			1400	1,21881	0,00034				1400	1,19453	0,00032	-2,87533
			1500	1,20951	0,00040				1500	1,18497	0,00041	-2,95209
			1600	1,19960	0,00033				1600	1,17559	0,00040	-2,93543
			1700	1,19019	0,00038				1700	1,16760	0,00037	-2,80271
			1800	1,18028	0,00038				1800	1,15849	0,00039	-2,74759
			1900	1,17251	0,00044				1900	1,15029	0,00034	-2,84048
2000	1,16299	0,00032	2000	1,14107	0,00037	-2,84790						
2100	1,15427	0,00030	2100	1,13282	0,00039	-2,82834						
2200	1,14582	0,00035	2200	1,12500	0,00036	-2,78473						

Tabela 21. Combustível enriquecido a 1,9% revestido com SiC HNS

Carbeto de Silício (SiC) reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S – <i>Begin Of Life (BOL)</i>												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio	Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio	$\alpha_{combustível}$
Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
293	293	293	0	1,24662	0,00039	618	583	840	0	1,21448	0,00042	-3,88091
			500	1,16260	0,00041				500	1,13467	0,00049	-3,87065
			600	1,14766	0,00035				600	1,11928	0,00035	-4,03899
			700	1,13282	0,00038				700	1,10511	0,00035	-4,04653
			800	1,11853	0,00036				800	1,09172	0,00031	-4,01375
			900	1,10453	0,00031				900	1,07773	0,00040	-4,11585
			1000	1,09040	0,00026				1000	1,06519	0,00033	-3,96801
			1100	1,07721	0,00038				1100	1,05242	0,00031	-3,99760
			1200	1,06466	0,00035				1200	1,03935	0,00031	-4,18150
			1300	1,05243	0,00035				1300	1,02803	0,00032	-4,12291
			1400	1,04077	0,00033				1400	1,01660	0,00032	-4,17623
			1500	1,02812	0,00038				1500	1,00439	0,00033	-4,20111
			1600	1,01643	0,00032				1600	0,99384	0,00033	-4,08823
			1700	1,00517	0,00036				1700	0,98244	0,00035	-4,20791
			1800	0,99472	0,00032				1800	0,97177	0,00029	-4,34041
			1900	0,98371	0,00032				1900	0,96186	0,00036	-4,22168
			2000	0,97320	0,00038				2000	0,95160	0,00034	-4,26393
2100	0,96316	0,00038	2100	0,94159	0,00030	-4,34813						
2200	0,95325	0,00033	2200	0,93179	0,00033	-4,41690						

Tabela 22. Combustível enriquecido a 2,5% revestido com SiC HNS

Carbeto de Silício (SiC) reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S – <i>Begin Of Life (BOL)</i>												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio	Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio	$\alpha_{combustível}$
Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
293	293	293	0	1,31585	0,00037	618	583	840	0	1,28539	0,00047	-3,29231
			500	1,24210	0,00040				500	1,21442	0,00039	-3,35470
			600	1,22930	0,00044				600	1,20089	0,00035	-3,51822
			700	1,21582	0,00033				700	1,18830	0,00032	-3,48230
			800	1,20260	0,00030				800	1,17519	0,00037	-3,54562
			900	1,18970	0,00035				900	1,16299	0,00037	-3,52917
			1000	1,17686	0,00035				1000	1,15139	0,00033	-3,43633
			1100	1,16443	0,00037				1100	1,13961	0,00039	-3,41936
			1200	1,15275	0,00035				1200	1,12755	0,00037	-3,54440
			1300	1,14200	0,00035				1300	1,11700	0,00038	-3,58289
			1400	1,12935	0,00033				1400	1,10532	0,00042	-3,51925
			1500	1,11895	0,00034				1500	1,09561	0,00041	-3,48054
			1600	1,10857	0,00042				1600	1,08499	0,00032	-3,58400
			1700	1,09757	0,00032				1700	1,07422	0,00036	-3,62055
			1800	1,08784	0,00038				1800	1,06488	0,00034	-3,62342
			1900	1,07688	0,00038				1900	1,05411	0,00035	-3,66710
			2000	1,06701	0,00030				2000	1,04517	0,00032	-3,58022
2100	1,05758	0,00037	2100	1,03593	0,00033	-3,61266						
2200	1,04796	0,00036	2200	1,02672	0,00031	-3,60886						



Tabela 23. Combustível enriquecido a 3,2% revestido com SiC HNS

Carbeto de Silício (SiC) reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S – <i>Begin Of Life (BOL)</i>												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio	Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio	$\alpha_{combustivel}$
Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
293	293	293	0	1,37059	0,00041	618	583	840	0	1,33989	0,00037	-3,05615
			500	1,30430	0,00038				500	1,27731	0,00044	-2,96170
			600	1,29253	0,00038				600	1,26556	0,00038	-3,01419
			700	1,28028	0,00042				700	1,25346	0,00040	-3,05532
			800	1,26873	0,00042				800	1,24237	0,00037	-3,05730
			900	1,25729	0,00040				900	1,23057	0,00040	-3,15724
			1000	1,24622	0,00051				1000	1,22047	0,00037	-3,09505
			1100	1,23501	0,00034				1100	1,21014	0,00047	-3,04216
			1200	1,22427	0,00036				1200	1,19952	0,00036	-3,08108
			1300	1,21339	0,00038				1300	1,18926	0,00037	-3,05698
			1400	1,20289	0,00035				1400	1,18006	0,00043	-2,94028
			1500	1,19342	0,00032				1500	1,16972	0,00033	-3,10374
			1600	1,18356	0,00035				1600	1,16002	0,00033	-3,13446
			1700	1,17316	0,00034				1700	1,15121	0,00036	-2,97122
			1800	1,16442	0,00035				1800	1,14107	0,00039	-3,21276
			1900	1,15409	0,00031				1900	1,13252	0,00038	-3,01701
2000	1,14526	0,00042	2000	1,12339	0,00034	-3,10761						
2100	1,13608	0,00034	2100	1,11515	0,00042	-3,02023						
2200	1,12728	0,00033	2200	1,10655	0,00033	-3,03815						

Tabela 24. Combustível enriquecido a 3,5% revestido com SiC HNS

Carbeto de Silício (SiC) reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S – <i>Begin Of Life (BOL)</i>												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio	Temperaturas (K)			Boro	$k_{inf}$	Desvio	$\alpha_{combustivel}$
Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
293	293	293	0	1,38718	0,00038	618	583	840	0	1,35678	0,00040	-2,95287
			500	1,32510	0,00037				500	1,29768	0,00043	-2,91517
			600	1,31326	0,00036				600	1,28657	0,00038	-2,88787
			700	1,30282	0,00037				700	1,27561	0,00043	-2,99322
			800	1,29109	0,00041				800	1,26506	0,00036	-2,91353
			900	1,27992	0,00036				900	1,25479	0,00038	-2,86056
			1000	1,26941	0,00042				1000	1,24389	0,00046	-2,95467
			1100	1,25814	0,00038				1100	1,23408	0,00040	-2,83293
			1200	1,24767	0,00033				1200	1,22427	0,00038	-2,80060
			1300	1,23748	0,00037				1300	1,21369	0,00042	-2,89575
			1400	1,22875	0,00038				1400	1,20431	0,00036	-3,01934
			1500	1,21784	0,00035				1500	1,19493	0,00042	-2,87809
			1600	1,20878	0,00036				1600	1,18584	0,00037	-2,92572
			1700	1,19940	0,00039				1700	1,17721	0,00035	-2,87311
			1800	1,18985	0,00043				1800	1,16776	0,00035	-2,90645
			1900	1,18083	0,00036				1900	1,15847	0,00035	-2,98822
2000	1,17237	0,00042	2000	1,15017	0,00035	-3,00981						
2100	1,16347	0,00040	2100	1,14189	0,00035	-2,96951						
2200	1,15436	0,00032	2200	1,13388	0,00032	-2,86045						

Após as análises das células de combustíveis com os diferentes enriquecimentos, com os dois revestimentos, com as variações da quantidade de boro, com a célula fria e quente, a *Zero Power* e a *Full Power*, tudo em *BOL*, os resultados do  $k_{inf}$  e  $\alpha_{combustível}$  tiveram comportamentos esperados. Então, nas seções seguintes, as células de combustíveis passaram a ser analisadas durante a evolução do combustível.

### **5.1.3. Evolução do combustível**

Durante a evolução do combustível as células com os mesmos enriquecimentos ( $^{235}\text{U}$  1,9%, 2,5%, 3,2% e 3,5%) e os revestimentos (Zircaloy e SiC HNS) usados em *BOL* foram analisadas com os módulos *TRITON-KENO VI* e *TRITON-NEWT*, através dos comandos *t-depl6* e *t-depl* respectivamente, com 10000 partículas, 2200 gerações e biblioteca de 238 grupos colapsada a partir da ENDF/BVII.0, cujos resultados foram comparados. A densidade de potência específica é de 38 W/gU durante o primeiro ciclo de 289,47 dias, o que equivale a uma queima total de 11 GWd/MTU e as temperaturas médias de operação são, as 873 K, quando o revestimento usado é o Zircaloy, conforme consta no *FSAR* de Angra II e 840 K, quando o revestimento usado é o SiC HNS, conforme correção realizada via código *RELAP5*. As temperaturas de trabalho dos outros materiais foram mantidas conforme descrito no *FSAR* e usados ao longo deste trabalho. Nesta fase, foram comparados os valores do  $k_{inf}$  das células de combustíveis com cada enriquecimento e revestimento, com os dois módulos e mantendo fixa a quantidade de 500 ppm de boro, conforme exercício apresentado no *FSAR* de Angra II (ELETROBRÁS, 2013).

### **5.1.4. Resultados**

Nas Tabelas 25 e 26, são mostradas as comparações dos valores do  $k_{inf}$  ao longo da queima de cada célula combustível com o respectivo enriquecimento e revestimento nos módulos *TRITON-KENO VI* e *TRITON-NEWT*.

Na Tabela 25, se observa que a diferença dos valores do  $k_{inf}$  na célula de combustível usando o revestimento Zircaloy (convencional) entre os módulos é ligeiramente maior

quando é usado o módulo *TRITON-KENO VI*, em média, atinge o valor máximo de 0,6%.

**Tabela 25. Valores do  $k_{inf}$  com o Zircaloy usando os módulos *TRITON (KENO VI e NEWT)***

Zircaloy								
	<i>TRITON-KENO VI</i>	<i>TRITON-NEWT</i>	<i>TRITON-KENO VI</i>	<i>TRITON-NEWT</i>	<i>TRITON-KENO VI</i>	<i>TRITON-NEWT</i>	<i>TRITON-KENO VI</i>	<i>TRITON-NEWT</i>
Queima	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$
GWd/MTU	1,9%	1,9%	2,5%	2,5%	3,2%	3,2%	3,5%	3,5%
0,00	1,1278	1,1212	1,2072	1,2003	1,2695	1,2627	1,2900	1,2833
0,55	1,0840	1,0765	1,1568	1,1504	1,2172	1,2127	1,2378	1,2312
1,65	1,0763	1,0709	1,1466	1,1406	1,2055	1,1989	1,2255	1,2188
2,75	1,0660	1,0610	1,1340	1,1285	1,1930	1,1866	1,2134	1,2067
3,85	1,0545	1,0493	1,1215	1,1157	1,1802	1,1737	1,2006	1,1939
4,95	1,0425	1,0378	1,1087	1,1029	1,1671	1,1607	1,1877	1,1812
6,05	1,0313	1,0266	1,0959	1,0904	1,1546	1,1481	1,1754	1,1686
7,15	1,0208	1,0159	1,0840	1,0784	1,1423	1,1358	1,1632	1,1565
8,25	1,0103	1,0057	1,0724	1,0670	1,1304	1,1241	1,1514	1,1447
9,35	1,0002	0,9959	1,0617	1,0561	1,1191	1,1129	1,1400	1,1335
10,50	0,9911	0,9867	1,0509	1,0457	1,1085	1,1020	1,1296	1,1227

Na Tabela 26 se observa que a diferença dos valores do  $k_{inf}$  na célula de combustível usando o revestimento SiC HNS (proposto) entre os módulos é ligeiramente maior quando é usado o módulo *TRITON-KENO VI*, em média, atinge o valor máximo de 0,5%.

**Tabela 26. Valores do  $k_{inf}$  com SiC HNS usando os módulos *TRITON (KENO VI e NEWT)***

SiC reforçado com Hi-Nicalon tipo S								
	<i>TRITON-KENO VI</i>	<i>TRITON-NEWT</i>	<i>TRITON-KENO VI</i>	<i>TRITON-NEWT</i>	<i>TRITON-KENO VI</i>	<i>TRITON-NEWT</i>	<i>TRITON-KENO VI</i>	<i>TRITON-NEWT</i>
Queima	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$
GWd/MTU	1,9%	1,9%	2,5%	2,5%	3,2%	3,2%	3,5%	3,5%
0,00	1,1378	1,1324	1,2175	1,2118	1,2807	1,2745	1,3015	1,2952
0,55	1,0918	1,0870	1,1670	1,1613	1,2281	1,2220	1,2481	1,2425
1,65	1,0856	1,0811	1,1564	1,1514	1,2158	1,2099	1,2357	1,2300
2,75	1,0752	1,0711	1,1443	1,1391	1,2034	1,1976	1,2236	1,2178
3,85	1,0635	1,0593	1,1313	1,1261	1,1901	1,1846	1,2106	1,2049
4,95	1,0520	1,0476	1,1183	1,1131	1,1771	1,1714	1,1976	1,1920
6,05	1,0401	1,0361	1,1054	1,1006	1,1642	1,1587	1,1853	1,1793
7,15	1,0294	1,0252	1,0936	1,0884	1,1517	1,1463	1,1732	1,1670
8,25	1,0191	1,0149	1,0818	1,0768	1,1400	1,1344	1,1611	1,1553
9,35	1,0090	1,0049	1,0710	1,0658	1,1286	1,1230	1,1497	1,1439
10,50	0,9995	0,9955	1,0599	1,0552	1,1181	1,1120	1,1387	1,1330

Do mesmo modo que as Tabelas 26 e 27 apresentam as comparações dos valores do  $k_{inf}$  entre os módulos *TRITON-KENO VI* e *TRITON-NEWT*, nas Figuras 29 e 30 são mostradas as comparações dos valores do  $k_{inf}$  de cada célula de combustível com o seu

respectivo enriquecimento e revestimento. É possível observar em todas as situações que a célula de combustível revestida com o SiC HNS o  $k_{inf}$  é sempre maior, independente do módulo usado.

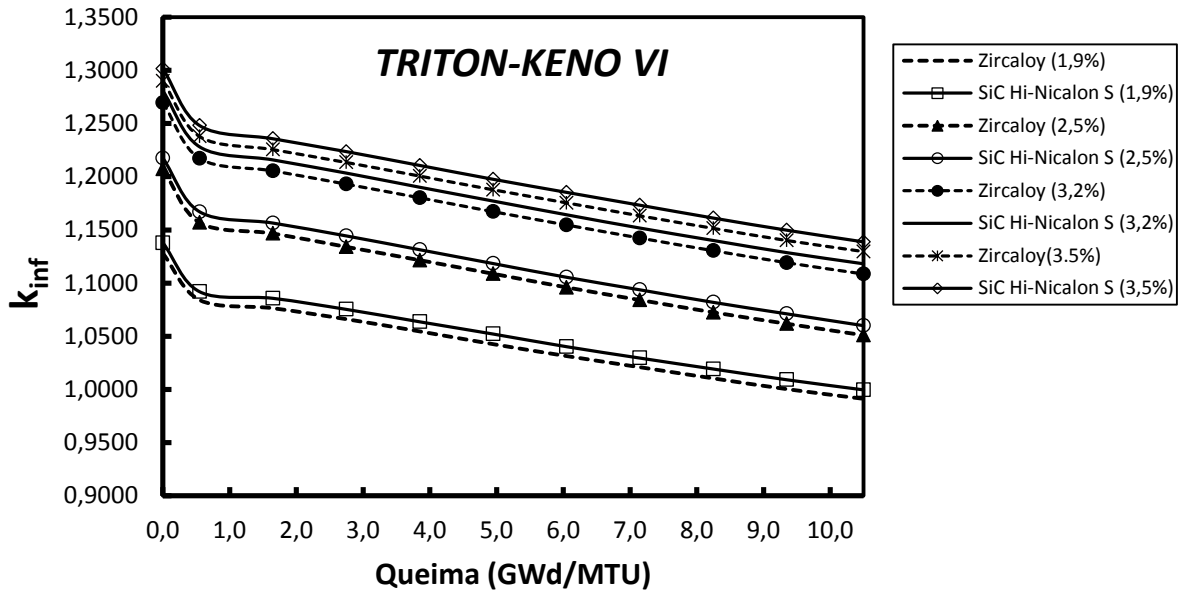


Figura 29. Comparação do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) da célula de combustível com diferentes enriquecimentos usando os dois revestimentos, através do módulo *TRITON-KENO VI*.

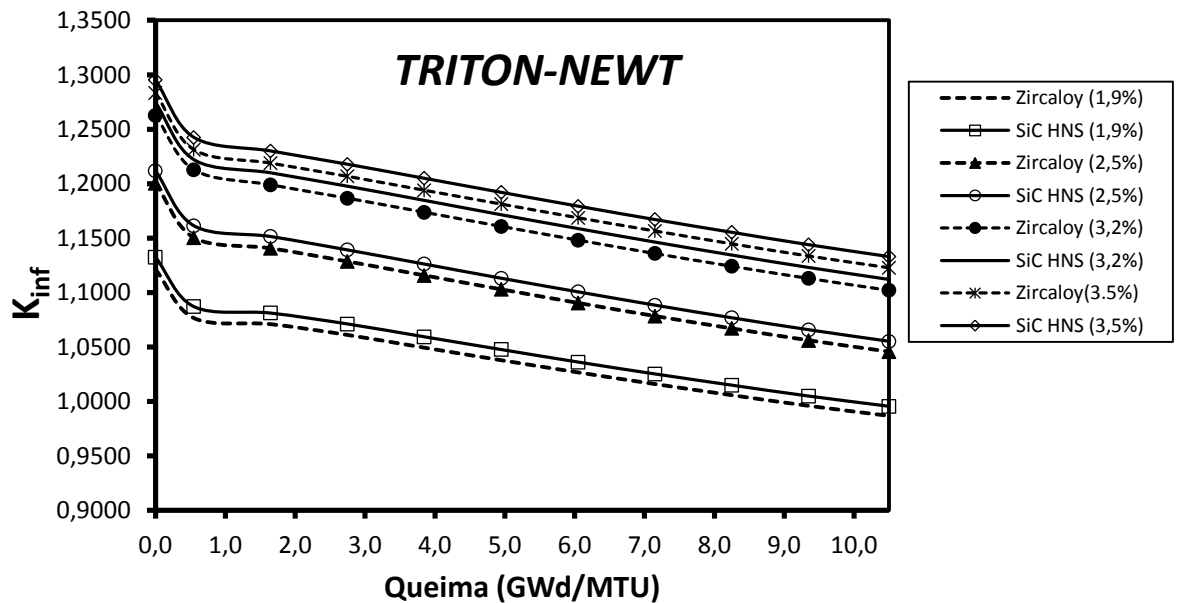


Figura 30. Comparação do fator de multiplicação infinito ( $k_{inf}$ ) da célula de combustível com diferentes enriquecimentos usando os dois revestimentos, através do módulo *TRITON-NEWT*.

Este fato, durante a evolução do combustível novamente ratifica o que foi amplamente demonstrado para as células de combustíveis com os diferentes enriquecimentos, variações de boro e de temperatura do combustível, estando as células frias, quentes e potências zero com os dois revestimentos no estado estacionário em *BOL*.

Em virtude dos bons resultados obtidos usando os dois módulos, a partir de agora o módulo *TRITON-NEWT* não mais foi usado, o que não acarretou prejuízo nas análises realizadas no núcleo do reator de Angra II.

## 5.2. Núcleo do reator de Angra II

De acordo com o *FSAR* de Angra II (ELETROBRÁS, 2013), o núcleo do reator de Angra II possui 193 conjuntos de combustíveis dispostos em arranjos 16 x 16, sendo 69 conjuntos com enriquecimento de  $^{235}\text{U}$  de 1,9%, 68 conjuntos com enriquecimentos de  $^{235}\text{U}$  de 2,5% e 56 conjuntos com enriquecimentos de  $^{235}\text{U}$  de 3,2%, em todos os conjuntos há 20 tubos guia, além dos conjuntos contendo 8 e 12 varetas de veneno queimável, respectivamente. Neste caso, a composição é de urânio natural, com parte das varetas de veneno queimável com 7,0% de  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . Durante toda a análise do núcleo do reator o controle da reatividade será feito apenas com o boro (B) diluído no moderador, além das varetas de veneno queimável.

Na Figura 31, é mostrado um elemento combustível típico, com 8 varetas de veneno queimável e 20 tubos guias. Em destaque, estão respectivamente representadas as geometrias das células varetas de combustível  $\text{UO}_2$ ,  $\text{UO}_2 + \text{Gd}_2\text{O}_3$  e tubo guia. Na Figura 32, é apresentado o elemento com os mesmos componentes, modificado apenas no número de varetas de veneno queimável que agora são 12. Na Figura 33, são mostrados elementos combustíveis sem varetas de veneno queimável e com os respectivos enriquecimentos 1,9%, 2,5% e 3,2%. Na Figura 34, é apresentado o núcleo do reator de Angra II. Na Tabela 28 são apresentados alguns parâmetros úteis na análise do núcleo do reator.

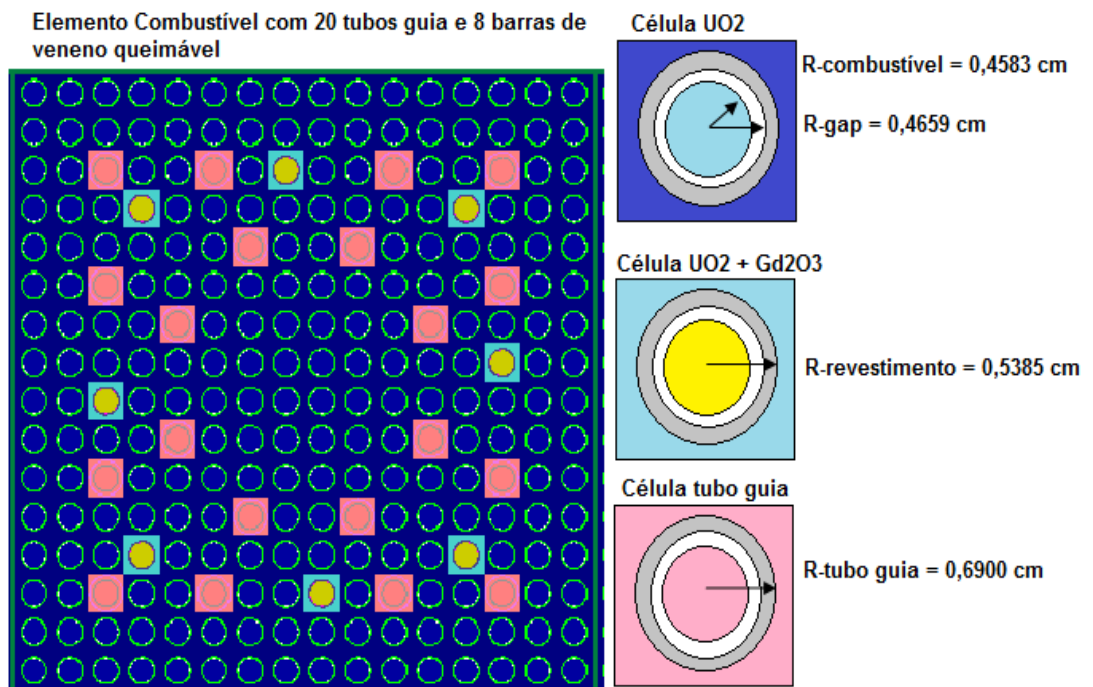


Figura 31. Elemento combustível com varetas de UO<sub>2</sub>, 20 tubos guia e 8 varetas de UO<sub>2</sub> + Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

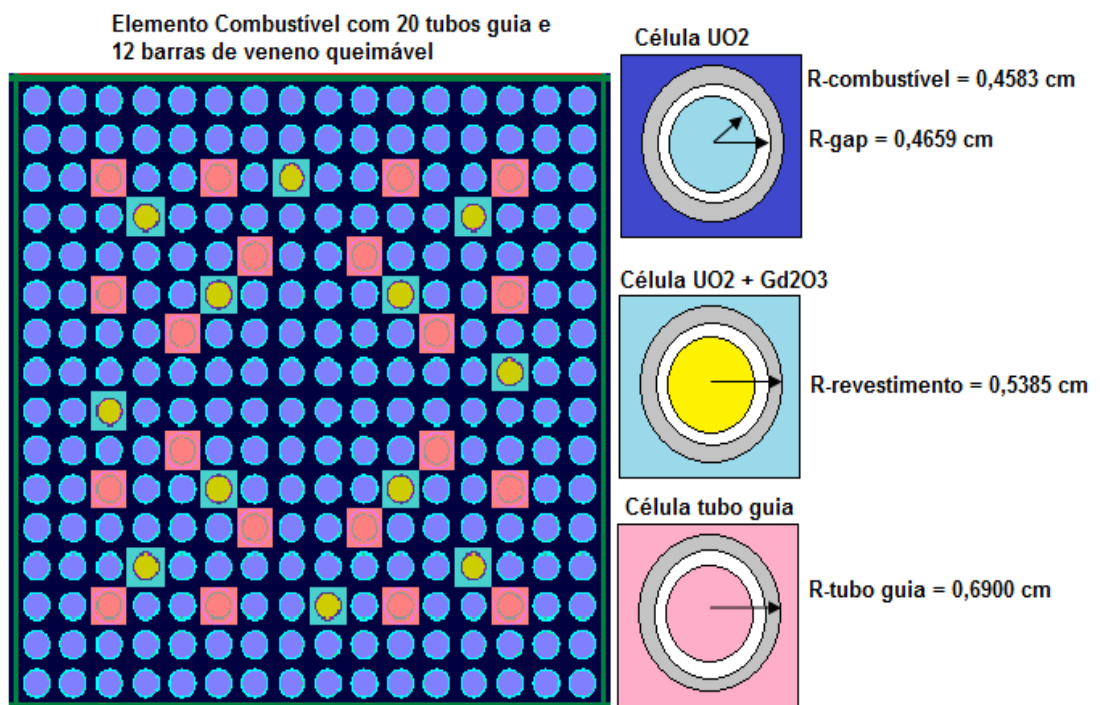


Figura 32. Elemento combustível com varetas de UO<sub>2</sub>, 20 tubos guia e 12 varetas de UO<sub>2</sub> + Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

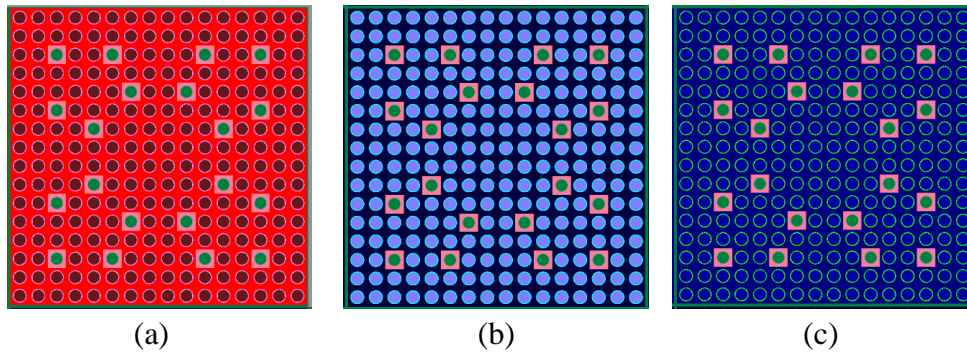


Figura 33. Elementos combustíveis com enriquecimentos (a) 1,9%, (b) 2,5%, (c) 3,2% e cada um com 20 tubos guias.

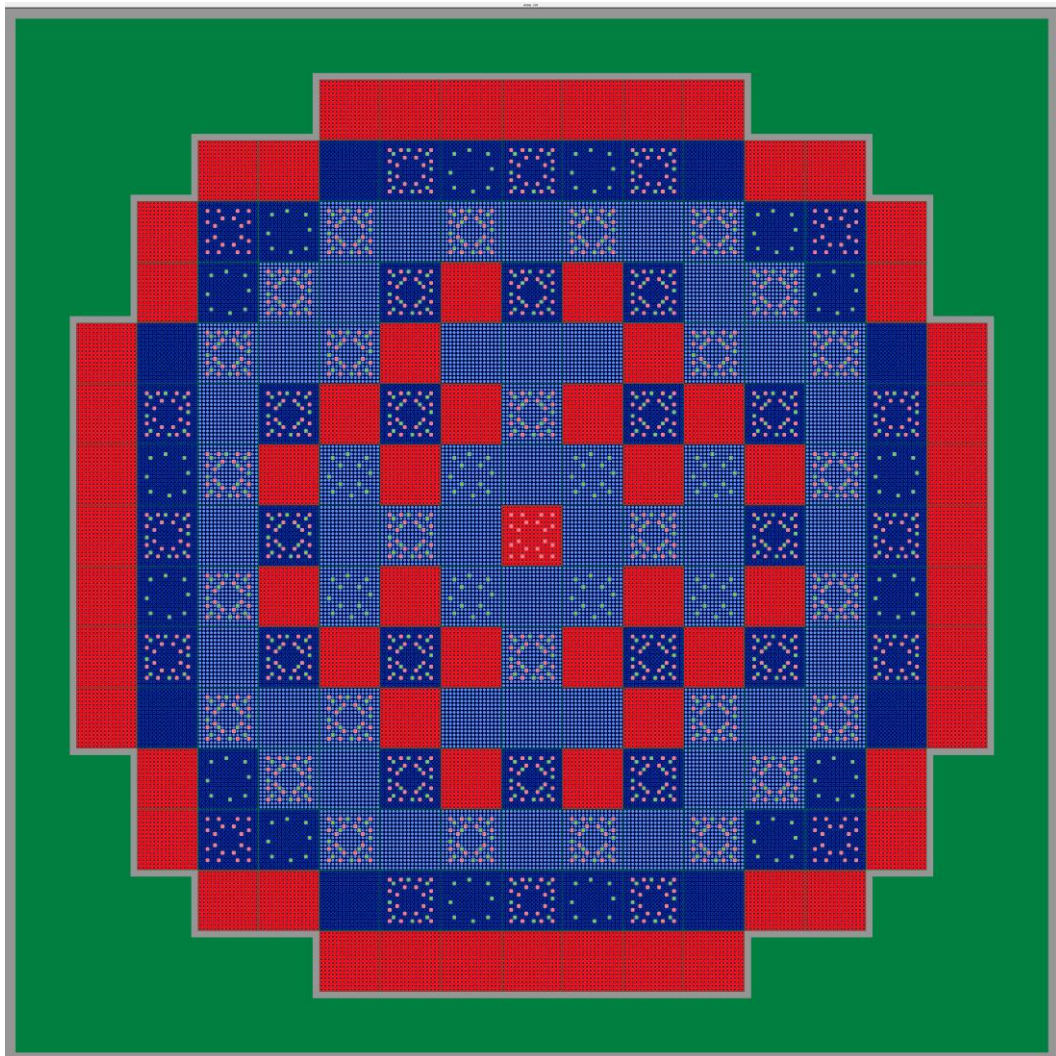


Figura 34. Núcleo do reator de Angra II



**Tabela 27. Parâmetros necessários na modelagem e simulação do núcleo do reator de Angra II**

Parâmetros		Potência Zero	Potência Total 33 GWd/MTU
Comprimento ativo Vareta de combustível		390,0 cm	391,6 cm
Comprimento ativo (Barra veneno queimável)		315,0 cm	316,3 cm
Gd-livre (topo)		45,0 cm	45,2 cm
Gd-livre (fundo)		30,0 cm	30,1 cm
Raio combustível		0,4555 cm	0,4583 cm
Dimensão do reticulado varetas de combustível (p)		1,43 cm	1,43 cm
Raio externo da vareta de combustível		0,5375 cm	0,5385 cm
Espessura revestimento (Zircaloy-4 e SiC HNS)		0,0725 cm	
Tubo guia (Zircaloy-4 e SiC HNS)			
Raio interno		0,6200 cm	0,6210 cm
Raio externo		0,6900 cm	0,6911 cm
Espessura		0,0700 cm	
Barra de controle Aço 4541			
Raio interno		0,4480 cm	
Raio externo		0,5100 cm	
Absorvedor (AgInCd)			
Raio externo		0,4435 cm	
Reticulados Combustíveis (incluindo água)		23,0 cm	23,11 cm
Temperatura	Zircaloy-4	Combustível	873 K
		Revestimento	618 K
		Moderador	583 K
	SiC HNS	Combustível	840 K
		Revestimento	618 K
		Moderador	583 K
Tempo			868,42 dias
Potência específica			38 W/gU

A mesma metodologia usada na análise das células de combustíveis e com as mesmas temperaturas foi adotada para o núcleo do reator de Angra II no estado estacionário em *BOL* e durante a evolução do combustível.

### 5.2.1. Estado estacionário à *Begin Of Life (BOL)*

A análise do fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) e o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{\text{combustível}}$ ) do núcleo do reator de Angra II, usando os

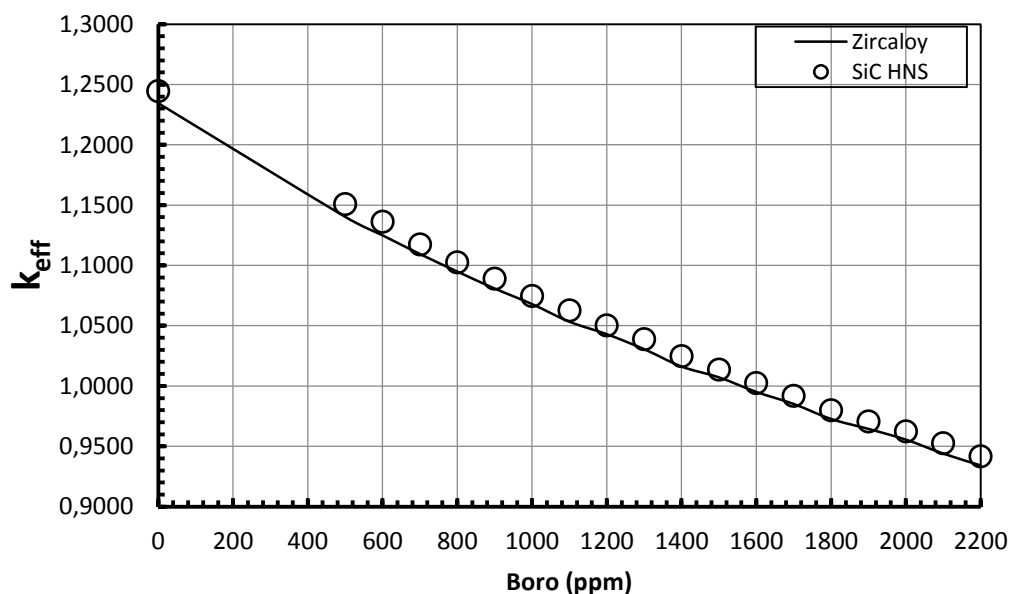


revestimentos Zircaloy (convencional) e SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (proposto) no estado estacionário em *Begin Of Life (BOL)*, foi realizada com o módulo CSAS, com 10000 partículas, 243 gerações, biblioteca 238 grupos colapsada da ENDF/BVII.0). Além disso, com o núcleo *CZP* e com o núcleo *HFP* e com variações na quantidade de boro, sendo 0, 500, 600, 700 e assim por diante até 2200 ppm de boro, valor usado para a recarga do núcleo conforme *FSAR* (ELETROBRAS, 2013).

Os resultados obtidos nestas análises são apresentados nas Tabelas da seção seguinte, além dos gráficos mostrando o comportamento do  $k_{\text{eff}}$  em função da quantidade de boro no moderador, usando os dois revestimentos.

### 5.2.2. Resultados

Na Figura 35, é apresentado o comportamento do fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ), com o núcleo quente e potência máxima (*Hot Full Power*), em função da quantidade de boro diluído no moderador. Como se esperava, o  $k_{\text{eff}}$  diminui quando se aumenta a quantidade boro, o que ocorre independentemente do revestimento utilizado, apesar do valor do  $k_{\text{eff}}$  ser ligeiramente maior quando o combustível é revestido com o SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS).



**Figura 35. Fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) com os dois revestimentos em função do boro inserido**

Nas Tabelas 28 e 29, são apresentados os resultados do fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ), o desvio padrão do código ( $\sigma$ ) e o valor do coeficiente de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{\text{combustível}}$ ) do núcleo do reator de Angra II, nas seguintes situações:

- frio e potência zero (*Cold Zero Power –CZP-*), quente e potência máxima (*Hot Full Power –HFP-*) e com variação de boro;
- usando os revestimentos, Zircaloy e o SiC HNS, respectivamente.

Em todas as situações o comportamento do  $k_{\text{eff}}$  é o esperado, ou seja, sofre redução à medida que aumenta a quantidade de boro no moderador, mesmo usando o revestimento proposto.

O  $\alpha_{\text{combustível}}$  do núcleo usando o SiC HNS é sempre negativo, igualmente ao  $\alpha_{\text{combustível}}$  quando o combustível é revestido pelo Zircaloy.

**Tabela 28. Valores do  $k_{\text{eff}}$  e  $\alpha_{\text{combustível}}$  do núcleo do reator de Angra II com o Zircaloy.**

Zircaloy – Begin Of Life (BOL)												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro ppm	$k_{\text{eff}}$	Desvio ( $\sigma$ )	Temperaturas (K)			Boro ppm	$k_{\text{eff}}$	Desvio ( $\sigma$ )	$\alpha_{\text{combustível}}$ ( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
Rev.	Mod.	Comb.				Rev.	Mod.	Comb.				
293	293	293	0	1,26082	0,00047	618	583	873	0	1,23450	0,00011	-2,91550
			500	1,16295	0,00051				500	1,14029	0,00051	-2,94615
			600	1,14616	0,00044				600	1,12494	0,00058	-2,94615
			700	1,12957	0,00044				700	1,10947	0,00051	-2,83755
			800	1,11618	0,00074				800	1,09490	0,00051	-2,76528
			900	1,10042	0,00046				900	1,08085	0,00057	-3,00217
			1000	1,08695	0,00058				1000	1,06793	0,00046	-2,83687
			1100	1,07273	0,00042				1100	1,05333	0,00049	-2,82508
			1200	1,06096	0,00054				1200	1,04297	0,00043	-2,96019
			1300	1,04701	0,00045				1300	1,03055	0,00042	-2,80306
			1400	1,03500	0,00044				1400	1,01618	0,00059	-2,63016
			1500	1,02429	0,00050				1500	1,00718	0,00053	-3,08518
			1600	1,01383	0,00059				1600	0,99512	0,00052	-2,85951
			1700	0,99944	0,00052				1700	0,98450	0,00055	-3,19746
			1800	0,99198	0,00049				1800	0,97269	0,00048	-2,50766
			1900	0,98013	0,00050				1900	0,96444	0,00057	-3,44689
2000	0,97142	0,00050	2000	0,95556	0,00079	-2,86178						
2100	0,95929	0,00041	2100	0,94400	0,00044	-2,94585						
2200	0,95026	0,00052	2200	0,93421	0,00069	-2,91110						

Tabela 29. Valores do  $k_{\text{eff}}$  e  $\alpha_{\text{combustível}}$  do núcleo do reator de Angra II com o SiC HNS.

SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S – <i>Begin Of Life (BOL)</i>												
Cold Zero Power (CZP)						Hot Full Power (HFP)						
Temperaturas (K)			Boro	$k_{\text{eff}}$	Desvio	Temperaturas (K)			Boro	$k_{\text{eff}}$	Desvio	$\alpha_{\text{combustível}}$
Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	Rev.	Mod.	Comb.	ppm		( $\sigma$ )	( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
293	293	293	0	1,26914	0,00048	618	583	840	0	1,24444	0,00072	-2,85908
			500	1,17026	0,00051				500	1,15088	0,00047	-2,63060
			600	1,15342	0,00055				600	1,13613	0,00056	-2,41208
			700	1,13889	0,00056				700	1,11744	0,00052	-3,08130
			800	1,12412	0,00060				800	1,10250	0,00052	-3,18917
			900	1,10933	0,00042				900	1,08910	0,00057	-3,06112
			1000	1,09345	0,00047				1000	1,07471	0,00052	-2,91536
			1100	1,08163	0,00056				1100	1,06261	0,00062	-3,02531
			1200	1,06701	0,00075				1200	1,05022	0,00042	-2,73914
			1300	1,05641	0,00039				1300	1,03880	0,00010	-2,93365
			1400	1,04251	0,00056				1400	1,02474	0,00053	-3,04093
			1500	1,03067	0,00051				1500	1,01356	0,00045	-2,99429
			1600	1,02096	0,00086				1600	1,00254	0,00078	-3,28997
			1700	1,00881	0,00048				1700	0,99183	0,00047	-3,10244
			1800	0,99937	0,00053				1800	0,98004	0,00038	-3,60807
1900	0,98514	0,00046	1900	0,97075	0,00038	-2,75086						
2000	0,97709	0,00045	2000	0,96229	0,00062	-2,87762						
2100	0,96698	0,00056	2100	0,95250	0,00068	-2,87408						
2200	0,95734	0,00039	2200	0,94179	0,00042	-3,15299						

Na Tabela 30, é mostrado o  $k_{\text{eff}}$ , o  $\alpha_{\text{combustível}}$ , o desvio padrão do código ( $\sigma$ ), em duas situações distintas: 1ª) usando o Zircaloy e 2ª) usando o SiC HNS, mas nas duas, mantendo fixas 500 ppm de boro diluído no moderador. As temperaturas do revestimento e do moderador permanecem fixas, portanto, variando apenas a temperatura do combustível. Em todos os casos, o comportamento do  $k_{\text{eff}}$ , é decrescente, embora ele seja sempre maior quando se usa o SiC HNS.

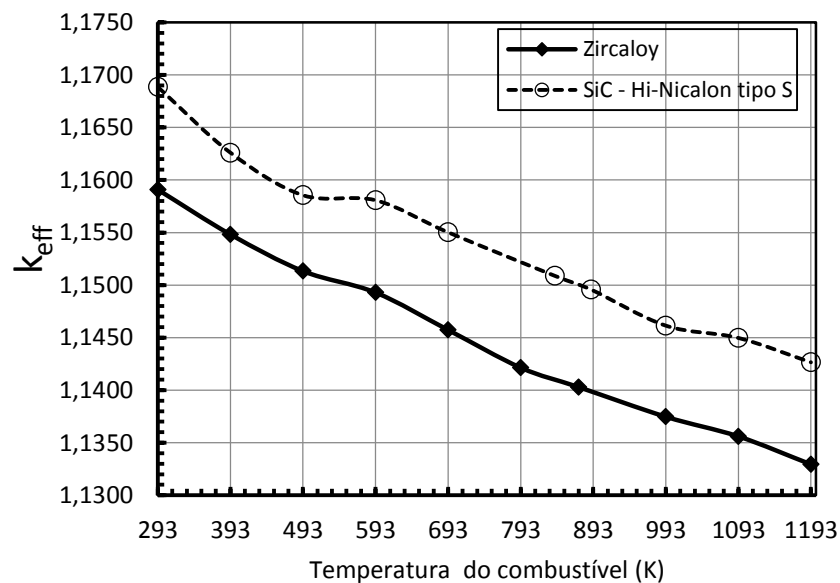
De forma semelhante ao ocorrido com o  $\alpha_{\text{combustível}}$  com variação de boro, aqui também, ele é sempre negativo independente do revestimento utilizado.

**Tabela 30. Valores do  $k_{\text{eff}}$  e  $\alpha_{\text{combustível}}$  do núcleo do reator de Angra II com variações na temperatura do combustível**

Núcleo do reator de Angra II: Com Varetas de Veneno Queimável e Boro: 500 ppm											
Begin Of Life (BOL)											
Zircaloy						SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S					
Temperaturas (K)			$k_{\text{eff}}$	Desvio ( $\sigma$ )	$\alpha_{\text{combustível}}$ ( $10^5 \cdot K^{-1}$ )	Temperaturas (K)			$k_{\text{eff}}$	Desvio ( $\sigma$ )	$\alpha_{\text{combustível}}$ ( $10^5 \cdot K^{-1}$ )
Rev.	Mod.	Comb.				Rev.	Mod.	Comb.			
618	583	873*	1,14029	0,00051	-2,45115	618	583	840*	1,15088	0,00047	-2,44215
		293	1,15908	0,00047				293	1,16885	0,00046	-1,95957
		393	1,15482	0,00041				393	1,16260	0,00010	-1,65776
		493	1,15133	0,00044				493	1,15855	0,00053	-2,18407
		593	1,14929	0,00065				593	1,15807	0,00058	-2,11867
		693	1,14929	0,00047				693	1,15502	0,00048	-2,11867
		793	1,14214	0,00054				890	1,14957	0,00062	-1,98032
		993	1,13747	0,00051				993	1,14614	0,00064	-2,34865
		1093	1,13560	0,00041				1093	1,14497	0,00074	-1,77273
		1193	1,13294	0,00056				1193	1,14265	0,00052	-1,77289

\*Referência para cada revestimento

Na Figura 36, é apresentado o fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) do núcleo com os dois revestimentos, em diversas temperaturas para o combustível, mas, conservando a temperatura do moderador e dos revestimentos. Para as diferentes temperaturas, observa-se que o  $k_{\text{eff}}$  do núcleo quando se usa o revestimento SiC HNS é, em média, aproximadamente 0,77% maior do que quando se usa o Zircaloy. A maior diferença (0,86%) ocorre quando a temperatura é 1193 K e a menor diferença (0,63%) quando a temperatura é 493 K.



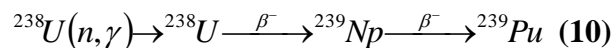
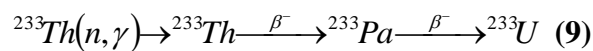
**Figura 36. Fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) com variações de temperatura no estado estacionário em BOL com os dois revestimentos.**

Diante de todos esses resultados amplamente favoráveis, sejam eles com variações na quantidade de boro, estando o núcleo frio ou quente, ou ainda com variações na temperatura do combustível, consolidam as expectativas quanto à possibilidade da substituição dos revestimentos dos PWRs. Portanto, foi expandida a análise do núcleo do reator de Angra II durante a evolução do combustível, onde foi avaliado inclusive a razão de conversão usando os dois revestimentos e o comportamento do fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) em função da quantidade de boro e gadolínio.

### 5.2.3. Evolução do combustível

Em geral, os reatores nucleares são conversores. Para uma compreensão adequada do conceito de conversão (C), é necessário saber que ele é um processo de transmutação de um isótopo fértil em um núcleo físsil.

Os isótopos mais importantes produzidos pela conversão são o  $^{233}\text{U}$  e o  $^{239}\text{Pu}$ , que são obtidos a partir da absorção de nêutrons conforme as reações mostradas nas Equações (9) e (10) respectivamente.



Quantitativamente a conversão (C), é uma grandeza adimensional definida como a relação entre o número de núcleos físséis produzidos ( $N_P$ ) pelo número de núcleos físséis consumidos ( $N_C$ ) no combustível. Matematicamente temos,

$$C = \frac{N_P}{N_C} \quad (11)$$

Os reatores cujo valor de C é maior que 1 são denominados super-regeneradores. Já para os reatores PWRs como o de Angra II, esse valor é menor que 1 e, portanto, são denominados conversores (Lamarsh & Baratta, 2001). O núcleo do reator de Angra II será analisado durante a evolução do combustível, através do módulo *TRITON-KENO VI*, com 10000 partículas, 2200 gerações, biblioteca de seções de choque de 238 grupos colapsada da ENDF/BVII, com o núcleo quente e potência máxima, durante

um ciclo aproximado de 289,56 dias, que produz uma queima de cerca de 11,0 GWd/MTU, quanto ao:

- Fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) e o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível ( $\alpha_{\text{combustível}}$ ) do núcleo do reator de Angra II, usando os revestimentos, Zircaloy e SiC HNS, com variações de boro, de 0 e 500 ppm diluído no moderador. Para a análise do  $\alpha_{\text{combustível}}$ , foi dado um acréscimo ( $\Delta T$ ) de 50 K às temperaturas médias de operações dos combustíveis, isto é, 873 K para o combustível revestido com Zircaloy, conforme *FSAR* (ELETROBRÁS, 2013) e 840 K para o combustível revestido com SiC HNS, conforme resultado encontrado via código *RELAP5*, apresentado anteriormente;
- Durante a evolução do combustível foram comparados o fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) em função das quantidades de boro e de gadolínio, especialmente o  $^{155}\text{Gd}$  e  $^{157}\text{Gd}$ , em virtude de serem os isótopos com maior abundância, 14,7% e 15,7% e maior seção de choque de absorção para nêutrons térmicos igual a  $5,8 \cdot 10^4$  b e  $2,4 \cdot 10^5$  b, respectivamente, conforme (Cochran & Tsoufanidis, 1999), quando o combustível está revestido com o Zircaloy e com SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS);
- Confrontação dos resultados obtidos da razão de conversão (C) de núcleos físséis produzidos ( $N_P$ ) pelo número de núcleos físséis consumidos ( $N_C$ ) no combustível durante a queima quando se usa o revestimento Zircaloy e o SiC HNS. Neste caso serão comparados os isótopos  $^{235}\text{U}$  e  $^{239}\text{Pu}$ .

#### 5.2.4. Resultados

Na Figura 37, é apresentado o fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) do núcleo com os dois revestimentos, o Zircaloy e o SiC HNS, nas respectivas temperaturas médias de operação do combustível, isto é, 873 K e 840 K, sem a presença de boro no moderador. É observado o mesmo perfil para as duas situações analisadas.

Entretanto, importante destacar que quando se usa o SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS), o valor do  $k_{\text{eff}}$  é sempre maior, durante toda a queima. Em média é cerca de 0,65% maior, tendo a sua menor diferença percentual (0,61%)

próximo da queima de 7,79 GWd/MTU e a sua maior diferença percentual (0,70%) no início do ciclo.

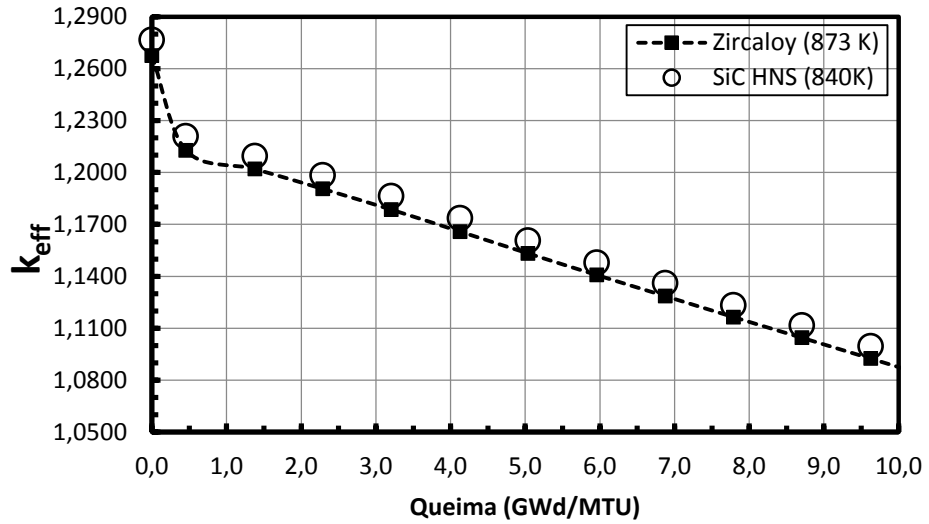


Figura 37. Valor do  $k_{eff}$  do núcleo durante a queima sem boro, com veneno queimável e os revestimentos, Zircaloy (convencional) e SiC HNS (proposto).

Conforme pode ser observado na Figura 38, o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível é negativo durante todo o período de queima com ambos revestimentos, fato de grande relevância, pois demonstra que o núcleo pode se estabilizar sem a interferência externa, mantendo assim, a potência controlada e a segurança das instalações.

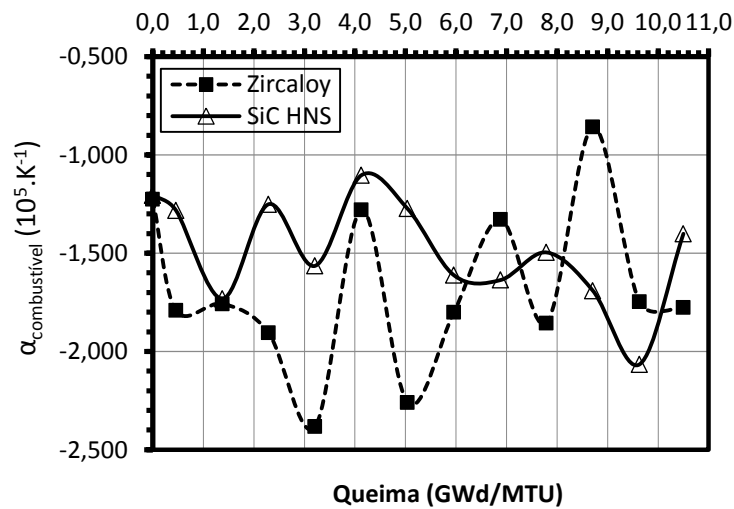
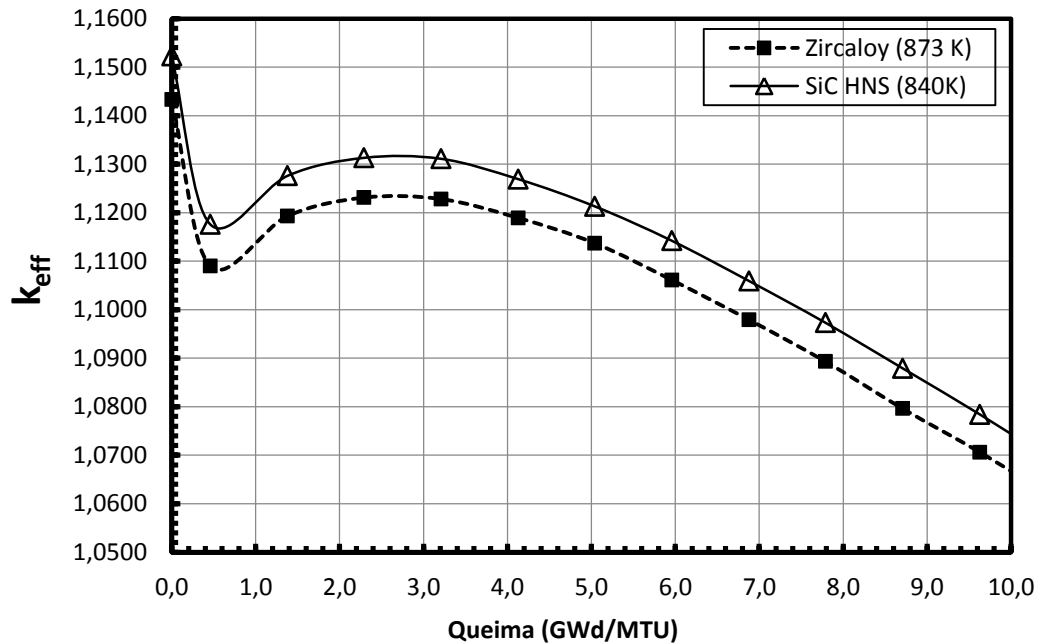


Figura 38. Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível do núcleo com os dois revestimentos, com 500 ppm de boro e veneno queimável.

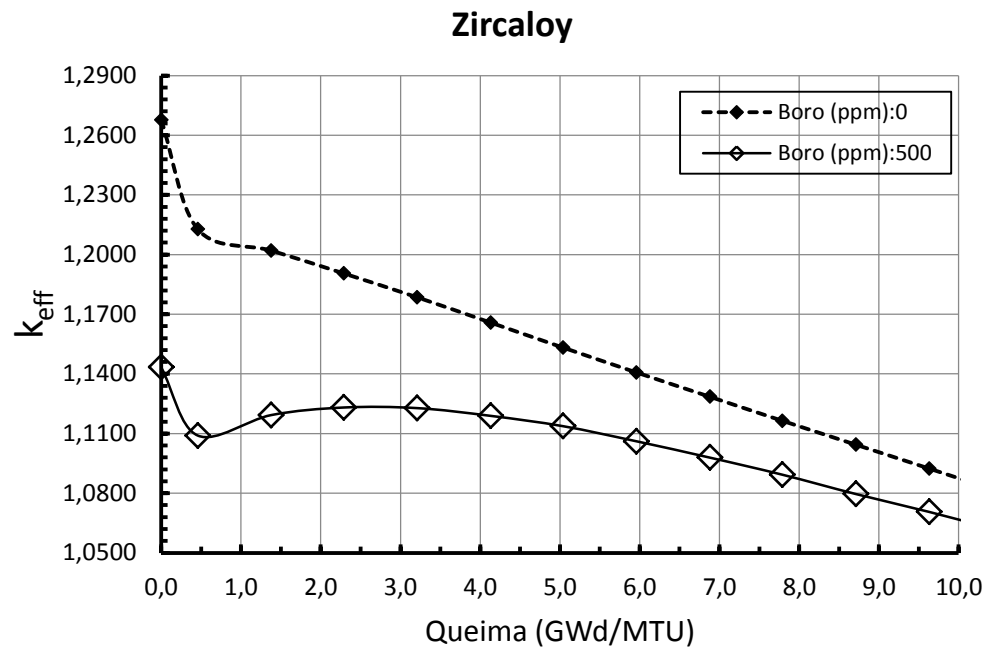
Na Figura 39, é apresentado o fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) do núcleo com os dois revestimentos, o Zircaloy e o SiC HNS, nas respectivas temperaturas médias de operação do combustível, isto é, 873 K e 840 K, porém com 500 ppm de boro e veneno queimável. O que se observa de mais relevante, é a forte ação da combinação do boro e do veneno queimável na reatividade no início do ciclo, o que ocorre nas duas situações analisadas, mas ainda assim, é mantido o mesmo perfil gráfico.



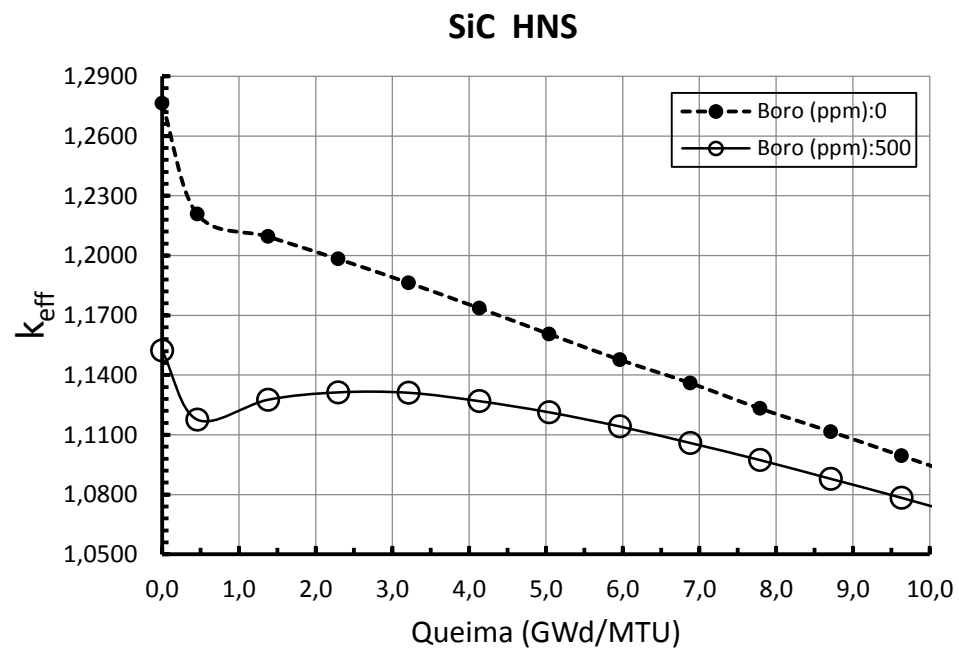
**Figura 39.** Valor do  $k_{\text{eff}}$  do núcleo durante a queima com 500 ppm de boro, com veneno queimável e com os revestimentos, Zircaloy e SiC HNS.

Nas Figuras 40(a, b) são apresentados o comportamento do fator de multiplicação efetivo ( $k_{\text{eff}}$ ) quando se usa, respectivamente, o Zircaloy e o SiC HNS, sem boro e com 500 ppm de boro. Em ambas figuras o mesmo comportamento é observado, ou seja, no núcleo com 500 ppm de boro os valores do  $k_{\text{eff}}$  são aproximadamente 10,87% e 10,78% menores respectivamente para Zircaloy e SiC HNS.





(a)

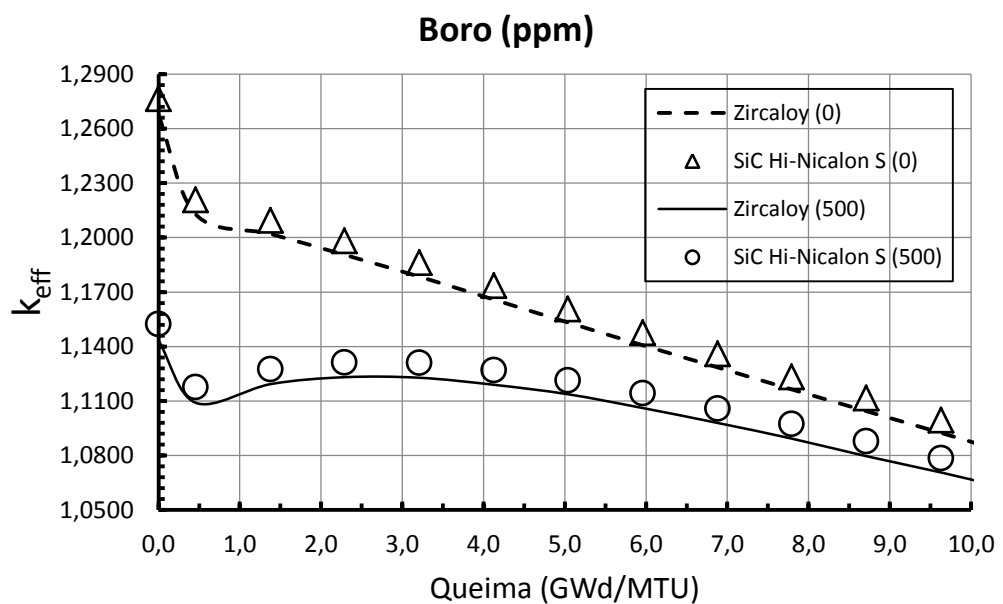


(b)

Figura 40. Valores do  $k_{eff}$  nos dois revestimentos sem e com 500 ppm de boro.

Na Figura 41, são apresentadas as comparações dos valores do  $k_{eff}$  do núcleo em quatro situações, sendo, combustível revestido com Zircaloy sem boro e com 500 ppm

de boro e as outras duas situações, combustível revestido com SiC HNS sem boro e também com 500 ppm de boro. Em todas as situações, a combinação do boro com o veneno queimável desempenha de forma eficiente suas funções, pois, reduz a reatividade inicial, não importando o revestimento, aproximadamente em 11,0%, ao longo da queima à medida que o boro e veneno queimável são consumidos, chegando ao final do ciclo com uma diferença menor que 2,0%, independente do revestimento usado.



**Figura 41.** Comparação dos valores de  $k_{eff}$  nos dois revestimentos sem e com boro.

Na Figuras 42, é apresentada as curvas dos valores da composição de  $^{155}\text{Gd}$  e  $^{157}\text{Gd}$ , em função do tempo. Como se observa, os gráficos são coincidentes, ou seja, a quantidade de gadolínio durante a evolução do combustível reduz da mesma forma, independentemente do revestimento usado. Fato importante, pois demonstra que o SiC HNS não interfere na cinética de queima do veneno queimável, ou seja, a quantidade final de veneno queimável no primeiro ciclo é praticamente a mesma.

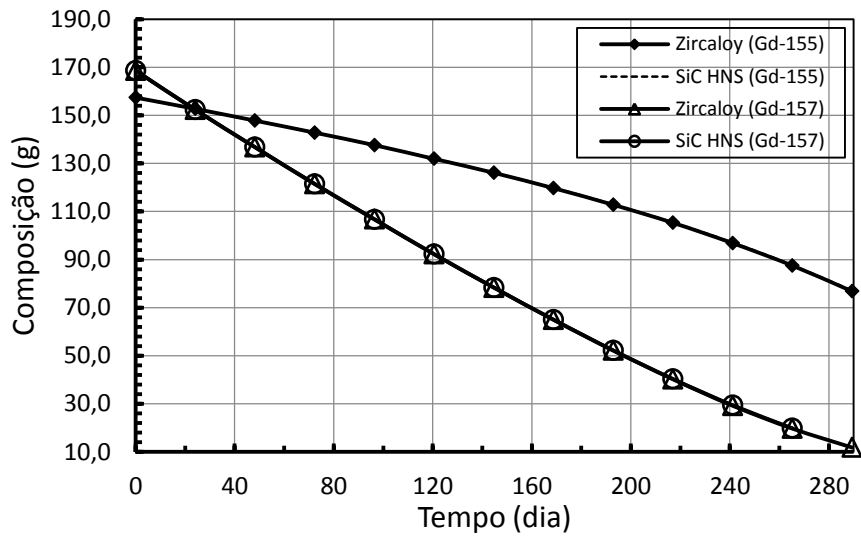


Figura 42. Valores da massa de Gd-155 e Gd-157 em função do tempo para os dois revestimentos.

Nas Tabelas 31 e 32 são apresentadas as composições de boro e dos venenos queimáveis ( $^{155}\text{Gd}$  e  $^{157}\text{Gd}$ ) durante a queima, no primeiro ciclo, ao longo do tempo. Nelas podem ser observados que, a quantidade de boro e dos venenos queimáveis diminuem como se espera, o que ocorre praticamente da mesma maneira, independente dos revestimentos usados, ou seja, Zircaloy (convencional) e SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS) (proposto).

**Tabela 31. Comparação da variação do B no núcleo com os dois revestimentos durante a queima.**

Massa (g)					
	Zircaloy	SiC HNS		Zircaloy	SiC HNS
Tempo (d)	Boro	Boro	Tempo (d)	Boro	Boro
0,0	12,52	12,52	156,8	9,44	9,45
12,1	12,26	12,26	181,0	9,02	9,02
36,2	11,74	11,75	205,1	8,60	8,62
60,3	11,25	11,26	229,2	8,20	8,21
84,5	10,78	10,78	253,4	7,81	7,83
108,6	10,32	10,33	277,5	7,43	7,45
132,7	9,87	9,88	289,6	7,25	7,26

Tabela 32. Comparação da variação de Gd no núcleo com os dois revestimentos durante a queima.

Massa (g)				
Tempo (d)	Zircaloy		SiC HNS	
	<sup>155</sup> Gd	<sup>157</sup> Gd	<sup>155</sup> Gd	<sup>155</sup> Gd
0,0	157,40	168,60	157,40	168,60
12,1	152,70	152,30	152,60	152,30
36,2	147,80	136,80	147,80	136,70
60,3	142,80	121,50	142,80	121,40
84,5	137,60	106,80	137,50	106,70
108,6	131,90	92,23	132,00	92,25
132,7	126,10	78,37	126,10	78,37
156,8	119,70	64,93	119,80	65,03
181,0	112,80	52,18	112,90	52,24
205,1	105,30	40,22	105,40	40,34
229,2	96,84	29,23	97,07	29,44
253,4	87,50	19,72	87,67	19,84
277,5	76,82	11,83	77,05	11,95

Na Figura 43, são apresentados os valores do  $k_{\text{eff}}$  em função dos <sup>155</sup>Gd e <sup>157</sup>Gd, quando o núcleo possui 500 ppm de boro. É possível constatar que no início da queima há forte atuação do boro combinado com o veneno queimável, conforme depressão do gráfico no intervalo de queima 0,0 a 1,0 GWd/MTU, instante em que o valor do  $k_{\text{eff}}$  sai de valores próximos de 1,15 e atinge 1,11. Nesse intervalo, a quantidade de <sup>155</sup>Gd é aproximadamente 157,40 g, não importando qual o revestimento está sendo usado. No final da queima, isto é, próximo de 11,0 GWd/MTU, quando o núcleo está revestido com o Zircaloy, o valor do  $k_{\text{eff}}$  está em torno de 1,06 e existem aproximadamente 76,82 g de <sup>155</sup>Gd. Enquanto que, quando o revestimento usado é o SiC HNS, o valor do  $k_{\text{eff}}$  é aproximadamente 1,07 e o núcleo possui cerca de 77,05 g <sup>155</sup>Gd.

Quando se observa o comportamento do <sup>157</sup>Gd, a Figura 44 mostra que no início do ciclo o núcleo possui cerca de 168,60 g, não importando o tipo de revestimento. Neste instante, o valor do  $k_{\text{eff}}$  com o núcleo revestido com Zircaloy está em torno de 1,14 e revestido com SiC HNS o valor está próximo de 1,15. No intervalo de 0,0 a 1,0

GWd/MTU os valores de  $k_{eff}$  para as duas situações analisadas reduz aproximadamente 3,1%, e a quantidade de  $^{157}\text{Gd}$  também reduz, no entanto, cerca de 10,70%. No final do ciclo, isto é, na queima próxima de 11,0 GWd/MTU o valor do  $k_{eff}$  com o núcleo revestido com Zircaloy diminuiu cerca de 7,72% do valor inicial e com o núcleo revestido com SiC HNS o valor do  $k_{eff}$  reduziu cerca de 7,80% do valor inicial. Entretanto, a quantidade de  $^{157}\text{Gd}$  é menos que 7,1% do valor inicial, ou seja, a quantidade de  $^{157}\text{Gd}$  ao final do primeiro ciclo é menor que 12,0 g. Este fato é bastante importante, pois retrata uma sincronia na cinética de queima do veneno queimável não importando o tipo revestimento utilizado.

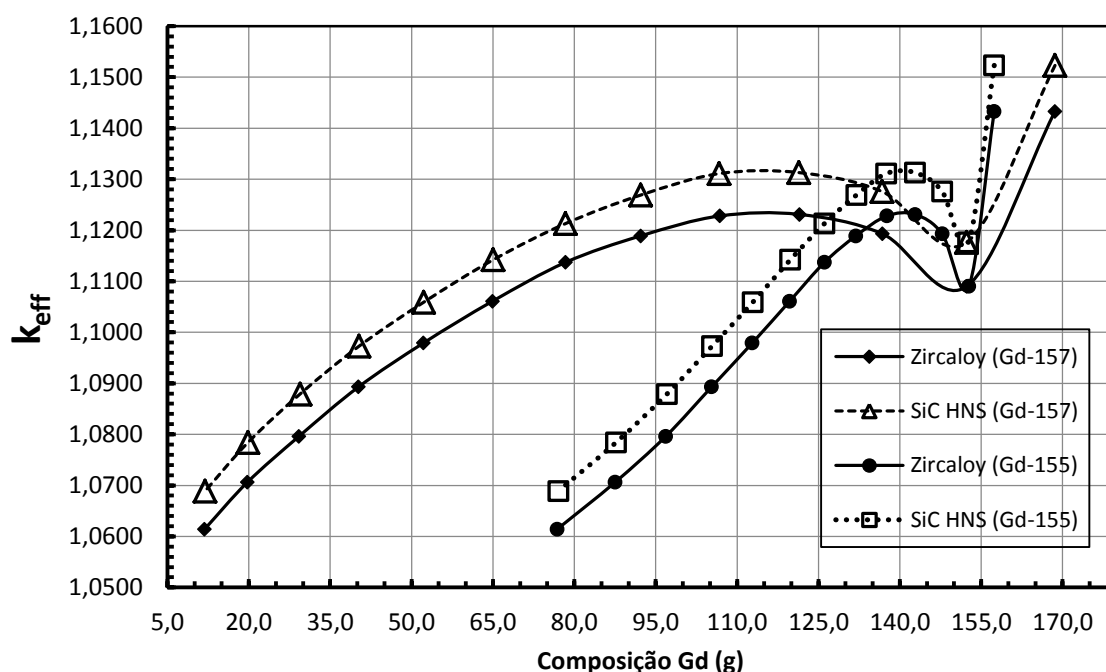
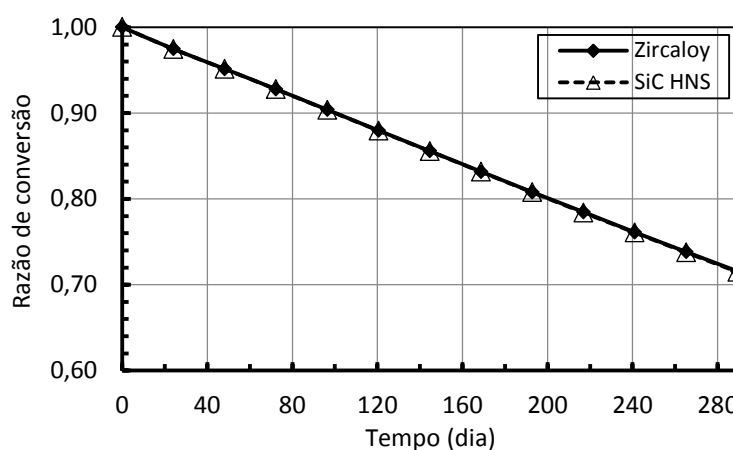


Figura 43. Comparação do  $k_{eff}$  com os dois revestimentos em função do Gd-155 e Gd-157.

Na Figura 44, é mostrada a razão de conversão (C) e, como se observa, o gráfico é linear e decrescente no primeiro ciclo do combustível, isto é, durante uma queima de aproximadamente 11,0 GWd/MTU, não importando o revestimento usado. O valor de C está próximo de 0,7, valor característico no primeiro ciclo do combustível, para um reator tipo o de Angra II.



**Figura 44.** Razão de conversão para o núcleo do reator de Angra II considerando  $^{235}\text{U}$  e  $^{239}\text{Pu}$ .

Então, após todos estudos em que o ECB foi submetido que passaram pela:

- 1) Validação do modelo e substituição do Zircaloy pelo SiC HNS;
- 2) Verificação e comparação do impacto das varetas de veneno queimável, no valor do  $k_{\text{inf}}$ , com o uso dos dois revestimentos;
- 3) Correção da temperatura média de operação do combustível revestido com SiC HNS, via código RELAP5;
- 4) Variações na quantidade de boro e variações na temperatura do combustível usando os dois revestimentos;
- 5) Análise do coeficiente de reatividade de temperatura do combustível, com o uso do Zircaloy e SiC HNS.

Foi realizado análise do comportamento térmico de uma vareta combustível, após a irradiação e submersa em um recipiente com água para refrigeração. O objetivo é, mais uma vez, avaliar a diferença na transferência de calor entre os dois revestimentos. Para este estudo foi usado o código ANSYS.

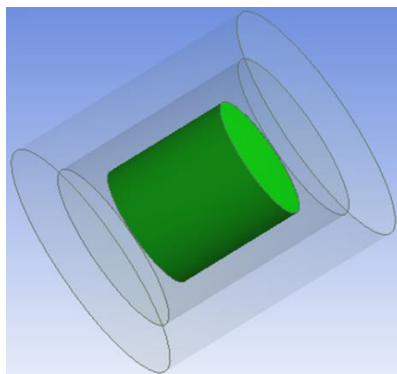
## **CAPÍTULO 6. ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE DECAIMENTO DE UMA VARETA COMBUSTÍVEL APÓS IRRADIAÇÃO**

A vareta de combustível usada nesta análise é do ECB descrita no benchmark (OECD, 2006), com enriquecimento de 4,0% de  $^{235}\text{U}$ , após ser irradiada com uma potência específica de 38 W/gU, durante 789,47 dias que gerou uma queima total de 30 GWd/MTU, usando os revestimentos, Zircaloy e SiC HNS, com as respectivas temperaturas médias de trabalho do combustível, isto é, 873 K e 840 K.

A análise da transferência de calor na vareta de combustível irradiado através dos revestimentos ocorrerá imediatamente após a finalização da queima do combustível, ou seja, ao final de 789,47 dias, e foi realizada através do código ANSYS (ANSYS, 2009). A fonte de energia térmica é o calor de decaimento principalmente dos produtos de fissão. A queima e o decaimento do combustível foi realizado com o código Origen2.1 (Ludwig & Renier, 1989).

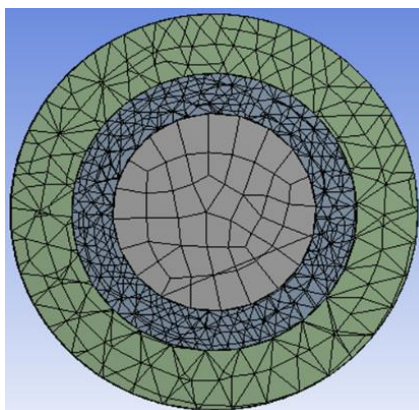
### **6.1. Simulação da vareta de combustível via código ANSYS**

A célula simulada tem 0,41266 cm de raio de combustível, comprimento ativo de 365,7 cm, tampões de 1,75 cm e revestimentos com espessura de 0,061704 cm (OECD, 2006). A fim de economizar tempo de simulações, *o gap* que é o espaço entre o combustível e o revestimento, geralmente preenchido com hélio, não foi considerado. As superfícies laterais do invólucro de água dos revestimentos são separadas por 30 cm, a tampa e o fundo deste invólucro estão separados por 20 cm entre as suas extremidades. Na Figura 45, é ilustrada uma representação da vareta de combustível.



**Figura 45. Vista da vareta de combustível imerso em água. De dentro para fora: combustível (cor verde), revestimento (camada intermediária) e água, respectivamente. A figura está fora de escala.**

A geometria foi detalhada com algoritmos internos do ANSYS, e foi adotada a opção de malha não estruturada. Isso implica que, tanto as formas quanto os tamanhos dos nós são determinados automaticamente. As opções de malha estruturada com a determinação do tamanho dos elementos foram também investigadas, no entanto, não proporcionaram melhorias significativas nos resultados e aumentaram o tempo de execução. A Figura 46, é mostrada a geometria em malha.



**Figura 46. Vista em corte da geometria da célula combustível do benchmark e da malha utilizada. Do centro para a extremidade: combustível, revestimento e água.**



### 6.1.2. Condições iniciais, propriedades físicas dos materiais e fonte de calor

As comparações de comportamento térmico entre os dois tipos de revestimentos – Zircaloy e SiC HNS - foram realizadas para o combustível (UO<sub>2</sub>), com enriquecimento de <sup>235</sup>U a 4,0%, conforme (OECD, 2006), que é a fonte de calor. A densidade de potência de calor de decaimento foi obtida através de simulações de queima e posterior decaimento com o código Origen2.1 (Ludwig & Renier, 1989), logo após a vareta ser retirada do reator nuclear, ou seja, no tempo (t=0).

Na Tabela 33, são apresentados alguns parâmetros utilizados para a simulação da vareta do EC do benchmark, no tempo t = 0.

**Tabela 33. Parâmetros para a simulação da vareta de combustível do ECB depois de irradiada**

Tipo de combustível	UO <sub>2</sub>
Densidade de calor	9,255765.10 <sup>5</sup> (W.m <sup>-3</sup> )
Temperatura do combustível	400 K
Temperatura do revestimento	350 K
Temperatura da água	313 K
Pressão no invólucro	1,01.10 <sup>5</sup> Pa

As propriedades físicas do combustível e materiais de revestimento como densidade, capacidade calorífica específica e condutividade térmica variam com a temperatura. As expressões e valores utilizados nas simulações são resumidos a seguir.

❖ Para o UO<sub>2</sub> (Popov et al., 2000):

- Massa Molar: 270 kg/kmol

- Densidade, em [kg/m<sup>3</sup>]:

$$\rho = 10970 \cdot \left[ 1 + 2,04 \times 10^{-5} (T - 273) \cdot 8,7 \times 10^{-9} (T - 273)^2 \right]^{-1} \quad (12)$$

- Calor específico, em [J/kg.K]:

$$c_p = 302,27 \cdot (548,68/T)^2 \exp(548,68/T) / [\exp(548,68/T) - 1]^2 + \left[ 8,741 \times 10^7 \cdot 18531,7 \exp(-18531,7 \cdot T^{-1}) \cdot T^2 \right] + (16,926 \cdot T) \quad (13)$$

Esta expressão é válida para o intervalo de temperatura de  $298,15 \text{ K} < T < 3120 \text{ K}$ .

- Condutividade térmica, em [W/m.K]:

$$k_c = 115,8 / (7,5408 + 17,692 \cdot t + 3,6142 \cdot t^2) + [\exp(-16,35 \cdot t^{-1}) \cdot 7410,5 \cdot t^{-2,5}] \quad (14)$$

Onde  $t=T/100$  e o intervalo de temperatura está entre  $298,15 \text{ K} < T < 3120 \text{ K}$ .

- ❖ Para o Zircaloy (IAEA, 2006):

- Massa Molar: 92 kg/kmol

- Densidade, em [kg/m<sup>3</sup>]

$$\rho = 6595,2 - 0,1477 \cdot T \quad (15)$$

Valor válido para  $T < 1083 \text{ K}$

- Calor específico, em [J/kg.K]:

$$c_p = 255,66 + 0,1024 \cdot T \quad (16)$$

Valor válido para intervalo de temperatura  $273 \text{ K} < T < 1100 \text{ K}$

- Condutividade térmica, em [W/m.K]:

$$k_c = 12,767 - 5,4348 \times 10^{-4} T + 8,9818 \times 10^{-6} T^2 \quad (17)$$

Valor válido para intervalo de temperatura  $300 \text{ K} < T < 1800 \text{ K}$ .

- ❖ Para o SiC HNS (Rashed, 2002):

De acordo com Rashed (2000) as expressões seguintes são válidas para intervalo de temperatura de  $560 \text{ K} < T < 2026 \text{ K}$ .

- Massa Molar: 56,1 kg/kmol
- Densidade: 3100 kg/m<sup>3</sup>
- Calor específico, em [J/kg.K]

$$c_p = 694779 + 590 \cdot T \quad (18)$$

- Condutividade térmica, em [W/m.K]

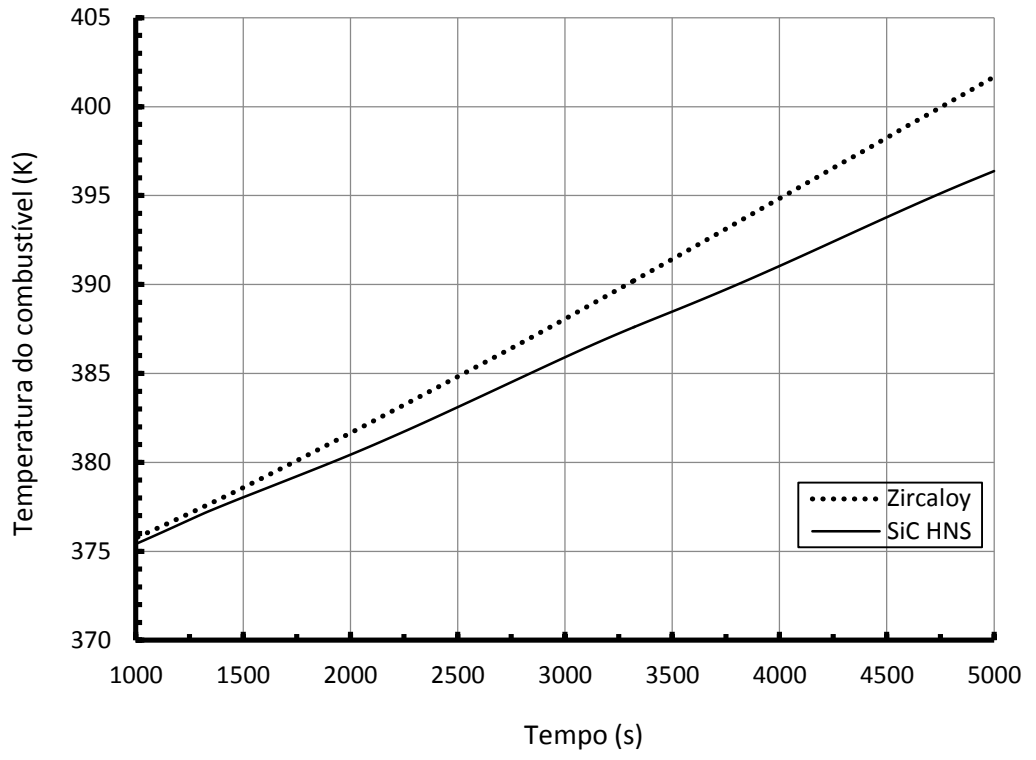
$$k_c = 925,5 \exp(-0,00303 \cdot T) \quad (19)$$

Os valores da condutividade térmica (k) são dependentes da temperatura. Por isso, e de acordo com Popov (2000), Rashed (2002) e IAEA (2006), foram realizados ajustes nas curvas pelo código ANSYS, resultando nas Equações (12, 14 e 17).

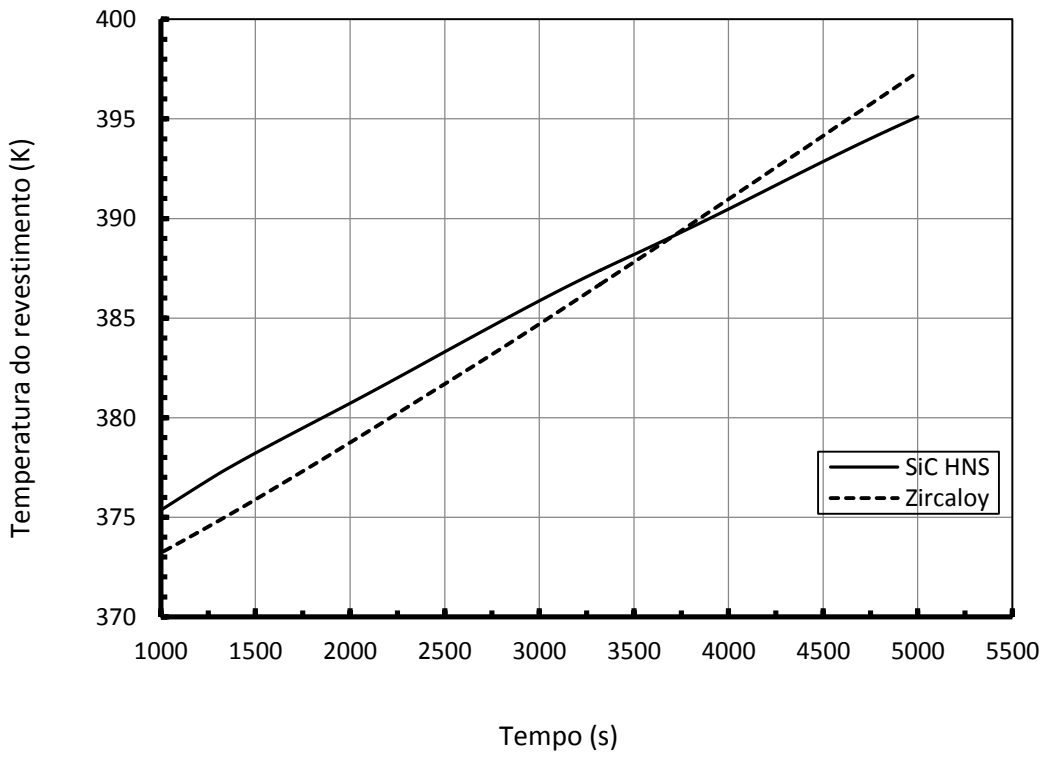
Importante destacar que foram estudados: a variação da temperatura no combustível, nos revestimentos e na água, não sendo, portanto, condição de contorno a temperatura inicial em cada situação.

### ***6.1.3. Resultado da análise da vareta de combustível***

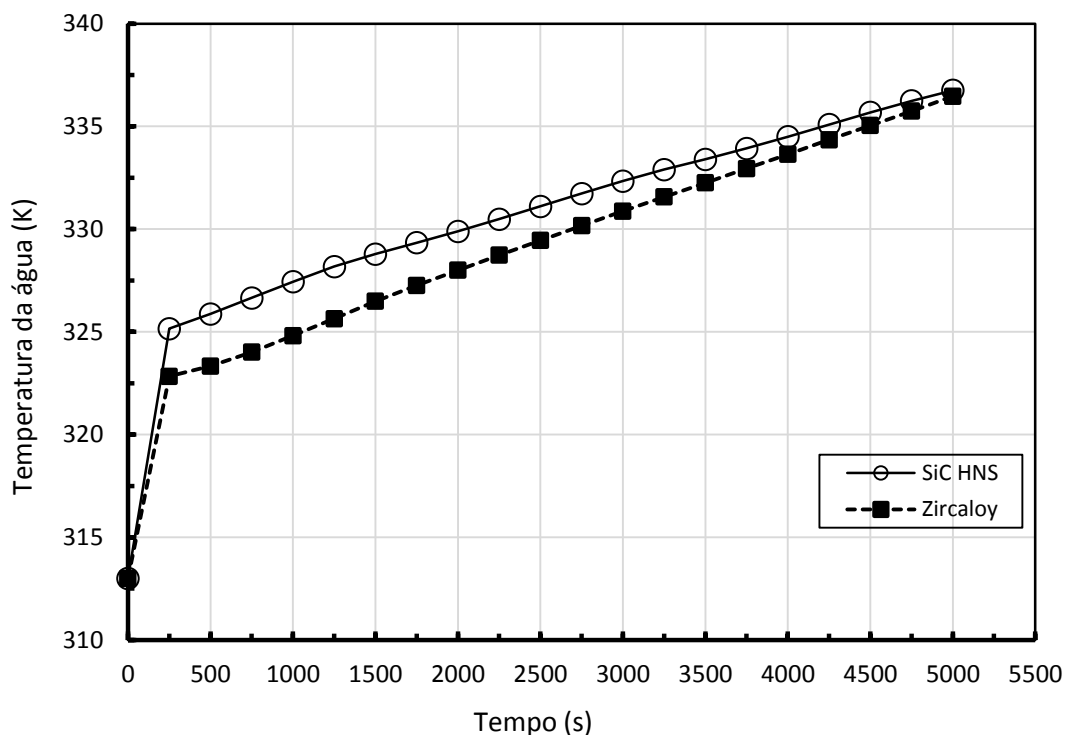
Como pode ser verificado na Figura 47 (a) o combustível tem sua temperatura aumentada mais rapidamente quando é revestido com o Zircaloy, fato confirmado através da Figura 47 (b), onde é mostrado o comportamento da temperatura nos revestimentos. Inicialmente, a temperatura é maior no revestimento SiC HNS. Entretanto, a temperatura do Zircaloy torna-se maior próximo ao tempo de 4000 s, corroborando assim, com o aumento da temperatura do combustível mencionado acima. Na Figura 47 (c), é mostrada a temperatura da água devido às presenças dos revestimentos e observa-se que a água aquece mais e mais rapidamente quando o revestimento o SiC HNS, mostrando que, na verdade, este revestimento dissipa mais calor ao ambiente do que o revestimento de Zircaloy.



(a)



(b)



(c)

**Figura 47. Comportamento temporal das temperaturas médias (a) do combustível, (b) do revestimento e (c) da água com o uso dos revestimentos, Zircaloy e SiC HNS.**

Esses fatos são relevantes, pois em caso de acidente, o tempo de reação é fundamental para a segurança das instalações. Como já mencionado, o fato do SiC HNS dissipar mais rapidamente o calor para o ambiente, favorece a integridade do material e da rede cristalina do combustível, o que reduz a possibilidade de escape de produtos de fissão.

Assim, diante do vasto estudo realizado até aqui, é possível extrair algumas conclusões importantes que são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34. Comparações de alguns parâmetros do Zircaloy e SiC HNS

Item	Zircaloy	SiC HNS	Melhorias
			Vantagens
$k_{inf}$	Menor	Maior	Possível extensão de queima
$k_{eff}$	Menor	Maior	Possível extensão de queima
$\alpha_{combustível}$	Maioria negativo	Sempre negativo	Mais seguro Maior ressonância Economia de nêutrons térmicos
$T_{combustível}$	Maior	Menor	O combustível pode sofrer maior variação de temperatura sem comprometer o revestimento
$T_{revestimento}$	Maior	Menor	Dissipa calor mais rapidamente
$T_{moderador}$	Menor	Maior $\longrightarrow$ Menor	

## CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que o revestimento à base de SiC, além de boa resistência à corrosão, ausência de pico de absorção de hidrogênio durante a operação normal do reator e um bom comportamento térmico, ele é um excelente condutor térmico, transferindo o calor de forma rápida e mais eficiente do combustível para o moderador, que o revestimento convencional de Zircaloy, facilitando dessa forma uma possibilidade de maior variação da temperatura do combustível sem o comprometimento da segurança das instalações nucleares.

O estudo termo-hidráulico confirmou a melhor condutividade térmica do SiC HNS, como revestimento, mostrando que a temperatura média de operação do combustível é aproximadamente 33 K menor que a temperatura média quando o combustível é revestido com o Zircaloy.

Os valores dos fatores de multiplicação infinito quando o combustível foi revestido com o SiC HNS sempre apresentaram valores maiores do que usando o revestimento de Zircaloy. Isto é devido às diferenças de seções de choque de absorção de nêutrons dos dois revestimentos e pelo fato do combustível revestido com SiC HNS apresentar uma temperatura média de operação menor que o Zircaloy. Por outro lado, os perfis do fator de multiplicação infinito são semelhantes, tanto no estado estacionário em *BOL*, quanto durante a evolução do combustível, com e sem uso de varetas de veneno queimável, sem boro e com variações de teores de boro e com variações de temperatura do combustível. Isto demonstra que o SiC HNS só afeta o número de nêutrons no sistema sem interferir no comportamento de parâmetros como o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível.

Os valores do coeficiente de reatividade de temperatura do combustível sempre tiveram valores negativos quando o revestimento usado é o SiC HNS, mantendo assim a estabilidade do reator sem a necessidade de interferência externa.

O uso do SiC HNS não interfere na cinética de queima de veneno queimável. Durante a queima do combustível, a quantidade de veneno queimável apresentou praticamente

a mesma redução quando se usa o revestimento convencional, o que foi constatado também com a quantidade de boro.

No estudo da temperatura da vareta de combustível queimada, foi ratificado que o SiC HNS dissipa o calor de forma mais eficiente que o Zircaloy. Sendo assim, em caso de falta de refrigeração, ele retira o calor mais rapidamente do combustível, mantendo assim, a integridade da rede cristalina, portanto, dificultando o escape de produtos de fissão para o meio ambiente.

Conclui-se então, diante da ampla gama de análises e resultados neutrônicos, que existe teoricamente potencial para a substituição do revestimento de Zircaloy pelo SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S (SiC HNS), sem o comprometimento da segurança. Há um ligeiro ganho neutrônico com o uso desse novo revestimento. Os resultados demonstraram que não existem diferenças neutrônicas significativas que possam desqualificar o uso do novo revestimento, do ponto de vista dos desempenhos térmico e neutrônico.

Entretanto, é necessário avançar com realização de ensaios termo-hidráulicos e testes de irradiação com a utilização do revestimento SiC reforçado com fibras de Hi-Nicalon tipo S para comprovar os limites atuais ou estabelecer novos. Pois há fortes indícios da qualidade e eficiência do SiC HNS nestas áreas, que poderão ratificar a possibilidade da substituição dos revestimentos nos diversos reatores PWRs espalhados pelo mundo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkan, Z., et al. Silicon Carbide encapsulated fuel pellets for light water reactors. In inert matrix fuel. 6<sup>th</sup> Workshop on inert matrix fuel, E-MRS Symposium B, 30 May-2 June 2000. Elsevier, United Kingdom, 2001.

Ansys Inc. Modeling and Meshing Guide. ANSYS , 2009, USA.

Arnold, R., McKrell, T, Kazimi, M. S., "Silicon Carbide Oxidation in High Temperature Steam", MIT-ANP-TR-139, Massachusetts Institute of Technology, Center of Advanced Energy Systems (2011).

Bloore, D. A., Reactor physics assessment of thick silicon carbide clad PWR fuels, Massachusetts Institute of Technology, 2005.

Bowman, S. M. e Dunn, M. E. SCALE Cross-section Libraries, Oak Ridge, Tennessee, USA: ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. III, Sect. M4 (2009).

Callister, W. D. Jr., Materials and science and engineering: an introduction, John Wiley & Sons, Inc., 7<sup>th</sup>, New York, 2007.

Center for Advanced Nuclear Energy Systems (CANES). NSUF Irradiation of novel SiC cladding for advanced LWRs, disponível em <http://canes.mit.ed/research> acesso em 25/10/2016.

Carpenter, D., Comparison of Pellet Cladding Mechanical Interaction for Zircaloy and Silicon Carbide Clad Fuel Rods in PWR, Departament of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 11/12/2006.

Carpenter, D. and Kazimi, M. S., "An Assessment of Silicon Carbide as a Cladding Material for Light Water Reactors", MIT-ANP-TR-132, Massachusetts Institute of Technology, Center of Advanced Nuclear Energy Systems (2010).

CEGA-002820, NP-MHTGR Material Models of Pyrocarbon and Pyrolytic Silicon Carbide. CEGA Corporation, 1993.

CNEN-NE-1,27, INSTALAÇÕES NUCLEARES, Garantia de Qualidade na aquisição, projetos e fabricação de elementos combustíveis, Rio de Janeiro, Resolução 02/95, Publicação DOU, 01/09/95, Resolução 15/95, Publicação DOU, 21/09/99.

Cochran, Robert.; Tsoufanidis, Nicholas., The nuclear fuel cycle: analysis and management. 2<sup>a</sup> edição, American Nuclear Society, 1999, La Grange Park, Illinois, USA, 1999 American Nuclear Society, 1999

Code of Federal Regulations, Title 10, "Energy", Part 50, "Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities", Sec,50,46, "Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light-Water Nuclear Power Reactors", U, S, Nuclear Regulatory Commission (2011).

Collier, J. G. and Hewitt, G. F. Introduction to Nuclear Power, Hemisphere Publishing, Washington, DC (1987).

Cotton, J., "Ultra-High Temperature Ceramics", *Adv. Mater Process.*, 168, 26 (2010).

Deck, C. P., Khalifa, H. E., Sammuli, B., Hilsabeck, T., Back, C. A., "Fabrication of SiC-SiC composites for fuel cladding in advanced reactor designs", *Progress in Nuclear Energy* 57, 38-45 (2012).

DeHART, M. D. TRITON: A Two-dimensional Transport and Depletion Module for Characterization of Spent Nuclear fuel, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. I, Sect. T1, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.

DeHART, M. D. NEWT: A New Transport Algorithm for two-dimensional discrete ordinates analysis in non-orthogonal geometries, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. II, Sect. F21, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.

Dewitt, D. P., Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, c2008. xix, 643 p. ISBN 9788521615842.

Dobisesky, Jacob P., Reactor Physics Considerations for Implementing Silicon Carbide cladding into a PWR environment, B. S., Systems Engineering (2009), United States Naval Academy, Massachusetts Institute of Technology, 2011.

Duderstad, J. J., Hamilton, L. J., Nuclear Reactor Analysis, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.

Eletronuclear S.A. Eletronuclear. *Final Safety Analysis Report Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto*. Rio de Janeiro, Brasil, UNIT2". REV. 13 Status April/2013.

"Extended Burnup Evaluation", BAW-10186-A, Rev., 1, U. S., Nuclear Regulatory Commission (2000).

Faria, R. B. de, Torres, F., Monteiro, F. B. A. and Pereira, C. "Replacement Zircaloy for Silicon Carbide as Fuel Cladding Material in PWR – A Neutronic Evaluation", *MRS Proceedings*, Vol. n. 1769 (2015).

Faria, R. B. de, Mantecón, J. G., Hamers, A. R., Fortini, A. and Pereira, C. "PWR fuel element neutronic analysis with burnable poison rods using Zircaloy and Hi-Nicalon type S claddings", *MRS Proceedings*, Vol n. 1814 (2016).

Fisher, G. R., Barnes, P. *Philos. Mag. B* 61 (1990) 217.

Glasstone, S. and Sesonske, A., Nuclear Reactor Engineering, Van Nostrand Reinhold (1981).

Goluoglu, S., Hollenbach, D. F., Petrie, L. M., CSAS6: Control Module for enhanced criticality safety analysis with Keno-VI, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol. I, Sect. C6, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2009.

Hallstadius, L., Johnson S., and Lahoda, E. Cladding for high performance fuel, "*Progress in Nuclear Energy*" 57, pp,71-76 (2012).

Heinisch, H. L., Greenwood, L. R., Weber, W. J. and Willifond, R. E. "Displacement Damage Cross Section for Neutron-Irradiated Silicon Carbide", *Journal Nuclear Material*, 307-311, 895 (2002).

Hofmann, P. and Kerwin-Peck, D., "UO<sub>2</sub>/Zircaloy-4 Chemical Interactions from 1000 to 1700 °C under Isothermal and Transient Temperature Conditions", *J. Nucl. Mater.*, 124, 80 (1984).

IAEA, Current trends in nuclear fuel for power reactors, 51<sup>st</sup> IAEA General Conf., International Atomic Energy Agency (2007).

Iwasaki, K., Matsui, T., Yanai, K., Yuda, R., Arita, Y., Nagasaki, T., Yokoyama, N., Tokura, I., Une, K., Harada, K. Effect of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Dispersion on the Thermal Conductivity of UO<sub>2</sub>, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol, 46, número 7, pag, 673-676 (2009).

Jepps, N. W., Page, T. F., *J. Cryst. Growth Charact.* 7 (1983) 259.

Kotani, M., Kohyama, A., Katoh, Y., 2001. Development of SiC/SiC composites by PIP in combination with RS. *Journal of Nuclear Materials* 289, 37-41.

Kingery, W. D., Bowen, H. K., Uhlmann, D. R., *Introduction to Ceramics*, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, New York, 1976.

Kubaschewski, O. and Alcock, C.B. "*Metallurgical Thermochemistry*", 5<sup>th</sup> Edition, *Pergamon Press*, New York, (1979).

Lamarsh, John R.; Baratta, Anthony J., *Introduction to Nuclear Engineering*, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2001.

Lara-Curzio, E., in: *Encyclopedia of Ceramic Engineering*, ed, M,N, Rahaman, (Marcel Dekker, New York, 1998) p, in press.

Li, B. (2013). Pellet Cladding Mechanical Interactions of Ceramic Claddings Fuels Under Light Water Reactor Conditions. (Master's thesis).

Lipowitz, J., Rabe, J. A., Zangvil, A. and Xu, Y., in: *Ceramic Engineering and Science Proceedings* vol. 18, No. 3 (American Ceramic Society, Westerville, OH, 1997) p. 147.

Lobo, R. M., Andrade, A. H. P., Novas ligas de zircônio para aplicação nuclear. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECiMat, 21 a 25 de novembro 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil.

Ludwig, S. B., Renier, J. P., Standard- and Extended-Burnup PWR and BWR Reactor Models for the ORIGEN2 Computer Code. ORNL/TM11018, December 1989.

McMinn, A., Darby, E. C., and Schofield, J. S., The terminal solid solubility of hydrogen in zirconium alloys, Zirconium in the Nuclear Industry: Twelfth International Symposium, ASTM STP 1354, G. P. Sabol and G. D. Moan, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000, pp. 173-195.

Montes, M. A., Pereda, R., King, S. J., Introduction del ZIRLO como material para componentes estructurales en combustible PWR. Revista de la Sociedad Nuclear Española, v. 180, p. 13-16, 1998.

Morton, product literature, 1995.

Motta, A. T., Light Water Reactor Fuel Degradation Mechanisms at High Burnup: Implications to Generation IV Materials, "MRS Symp, Proc, Vol, 1043, Materials Research Society (2007).

Munro, R. G., J. Phys. Chem. Ref, data 26 (1997) 1195.

Naslain, R., 2004. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview. Composites Science and Technology 64, 155-170.

NRC, Extended Burnup Evaluation, BAW-10186-A Topical Report, U. S. Nuclear Regulatory Commission (1997).

Newsome, G., Snead, L. L., Hinoki, T., Katoh, Y. and Peters D., Evaluation of neutron irradiated silicon carbide and silicon carbide composites, "Journal of Nuclear Materials", 371 (2007) 76-89.

OECD, Organisation for Economic Co-Operation and Development, "Burn-up Credit Criticality Benchmark - Phase II-D - PWR-UO<sub>2</sub> Assembly Study of Control Rod Effects on Spent Fuel Composition", NEA N° 6227, ISBN: 92-64-02316-X, France, (2006).

Ohring, Milton. Engineering materials science, Academic Press, Inc., Califórnia, 1995.

Okamura, K. Sato, M., Seguchi, T., Kawanishi, S. (1989). High-temperature strength improvement of Si-C-O fiber by the reduction of oxygen content, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Japanese International SAMPE Symposium: 929-34.

Olander, D. R., "Light water reactor fuel design and performance, "Encyclopedia of Materials, Science and Technology, Elsevier Science (2001) 4490.

Osborne, M. C., Ph.D Thesis, Dept. Materials Science and Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, 1997.

Pereira, F., Salomé, J., Viana, C., Cardoso, F., Velasquez, C. E., Barros, G. P., Pereira, C., Thermal Analysis of Spent Nuclear Fuels Repository, *Procedia Chemistry*, Volume 21, (2016), Pages 386-393.

Petrie, L. M., Fox, P. B., Lucius, K., Standard Composition Library, Nuclear Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vol, III, Sect, M8, Oak Ridge, Tennessee, 2009.

Pickman, D. O., "Design of fuels elements", *Nuclear Engineering and Design* 21 (1972) 303.

Pierron, O. N., Koss, D. A., Motta A. T., and Chan, K. S. "The influence of Hydride Blisters on the Fracture of Zircaloy-4", *Journal of Nuclear Materials*, 322, 21 (2003).

Popov, S. G., Carbajo, J. J., Ivanov V. K. and Yoder, G. L., Thermophysical properties of MOX and UO<sub>2</sub> fuels including the effects of irradiation, ORNL/TM-2000/351, (2000). <http://www.osti.gov/bridge>

Ransom, V. H., et al., RELAP5/MOD"0" Code Description: Volume 1, RELAP5 Code Development, CDAP-TR-057 (1979).

Rashed, A. H., "Properties and Characteristics of Silicon Carbide", Poco Graphite, Inc, (2002).

Rovner, L., Hopkins, G. and Chen, K. Y., Ceramic Materials for Fusion. In American Nuclear Society, 1975 Winter Meeting. (Summaries), 16-21 Nov. 1975, EUA.

Senor, D. J., Youngblood, G. E., Moore, C. E., Trimble, D. J., Newsome G. A. and Woods, J. J. "Effects of Neutron Irradiation on Thermal Conductivity of Sic-Based Composites and Monolithic Ceramics," *Fusion Technology* 30(3), 943-955 (1996).

Shimoda, K., Park, J. S., Hinoki, T., Kohyama, A. (2009). Microstructural optimization of high-temperature SiC/SiC composites by NITE process. *Journal of Nuclear Materials* 386-388, 634-638.

Simnad, M. T., A brief history of power reactors fuels, *J. Nucl. Mater.*, 100, 93 (1981).

Snead, L. L., Nozawa, T., Katoh, Y., Byun, T. -S., Kondo, S. Petti, D., (2007). Handbook of SiC properties for performance modeling, *J. Nucl. Mater.* 371, 329

Stempien, J. D., Carpenter, D. M., Kohse, G. and Kazimi, M. S. Characteristics of composite silicon carbide fuel cladding after irradiation under simulated PWR conditions, *Nuclear Technology*, Vol, 183, July 2013.

Takeda, M., Sakamoto, J., Saeki, A. and Ichikawa, H., in: *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, vol. 17, No. 4 (American Ceramic Society, Westerville, OH, 1996) p. 35.

Takeda, M., Urano, A., Sakamoto, J., and Imai, Y. (1998). Microstructure and oxidative degradation behavior of silicon carbide fiber Hi-Nicalon type S, "*Journal of Nuclear Materials*" 258-263, 1594-1599.

Takeda, M., Imai, Y., Ichikawa H., Ishikawa T., Seguchi T., Okamura, K. (1991). Properties of the low oxygen content SiC fiber on high temperature heat treatment, *Ceram, Eng, Sci Proc*; 12(7-8):1007-18.

Takeda, M., Imai Y., Ichikawa H., Ishikawa T., Kasai, N., Seguchi T., Okamura, K. (1992). Thermal stability of the low oxygen silicon carbide fibers derived from polycarbosilane, *Ceram Eng Sci Proc*; 13(7-8): 209-17.

Thomaz, D. E., History of zircaloy development. *Transactions of the American Nuclear Society* 18 (1974) 111.

U. S. Nuclear Regulatory Commission, RELAP5/MOD3 Code Manual, Nuclear Regulatory Research, NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, Vol. 5, Rev. 1, Washington, DC, August, 1995.

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.

U. S. Nuclear Regulatory Commission, Nuclear Safety Analysis Division, RELAP5/Mod3.3 Beta. Code Manual, volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods, May 2001, NUREG/CR-5535/Rev 1-Vol. I.

Yajima, S., Whoosh, J., Onori, M., Okamura, K, *Nature* 261 (1976) 683.

Youngblood, G. E., Jones, R. H., Morscher, G. N., Kohyama, A., in: *Fusion Materials Semiann. Prog. Report for period ending June 30 1997*, DOE/ER-0313/22 (Oak Ridge National Lab. 1997) p. 81.

Youngblood, G. E. and Jones, R. H., disponível em: [http://web.ornl.gov/sci/physical\\_sciences\\_directorate/mst/fusionreactor/pdf/june2000/youngblood4.pdf](http://web.ornl.gov/sci/physical_sciences_directorate/mst/fusionreactor/pdf/june2000/youngblood4.pdf), acesso em 27/08/2015.

Yueh, K., Carpenter, D., Feinroth, H., January 2010. Clad in clay. *Nucl. Eng. Int.* [http://www.inb.gov.br/ptbr/WebForms/Interna2.aspx?secao\\_id=58](http://www.inb.gov.br/ptbr/WebForms/Interna2.aspx?secao_id=58) access (2013).

World Nuclear Association (WNA), relatório atualizado em janeiro/2017. <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> (acesso em 13/03/2017, às 18h45min).

Zinkle, S. J. and Snead, L. L., *Thermophysical and Mechanical Properties of SiC/SiC Composites*, Oak Ridge National Laboratory, 1998. Disponível em <http://www.fusion.ucla.edu/apex/pdfs/SiC.pdf> acesso 01/06/2015.

## ANEXO: LISTA DOS TRABALHOS PUBLICADOS

- Ms. Ref. No.: NED-D-16-00431  
 Autores: **Rochkhudson B. de Faria**, Patrícia A. L. Reis, Javier G. Mantecon, Adolfo R. Hamers, Antonella L. Costa and Cláudia Pereira  
 Title: SENSITIVITY ANALYSIS OF A PWR FUEL ELEMENT USING ZIRCALOY AND SILICON CARBIDE CLADDINGS  
 Nuclear Engineering and Design (aceito para publicação)
  
- **R. B. de Faria**, J. G. Mantecón, A. R. Hamers, A. L. Costa, A. Fortini e C. Pereira.  
 PWR FUEL ELEMENT NEUTRONIC ANALYSIS WITH BURNABLE POISON RODS USING ZIRCALOY AND HI-NICALON TYPE S CLADDINGS. MRS ONLINE PROCEEDINGS LIBRARY ARCHIVE  
  
<http://dx.doi.org/10.1557/opl.2016.31>
  
- **Rochkhudson B. de Faria**, Felipe Torres, Fabiana B. A. Monteiro e Cláudia Pereira.  
 REPLACEMENT ZIRCALOY FOR SILICON CARBIDE AS FUEL CLADDING MATERIAL IN PWR – A NEUTRONIC EVALUATION. MRS ONLINE PROCEEDINGS LIBRARY ARCHIVE  
  
<http://dx.doi.org/10.1557/opl.2015.125>
  
- **FARIA, R. B.** ; Cardoso, F ; Salomé D. A. J. ; Pereira, C. ; Fortini, A. SENSITIVITY ANALYSIS OF A PWR FUEL ELEMENT USING ZIRCALOY AND SILICON CARBIDE CLADDINGS. In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015, 2015, São Paulo. The Brazilian Nuclear Program: State Policy for a Sustainable Development. São Paulo: ABEN, 2015. v. único. p. 1-9.
  
- **FARIA, R. B.**; Velasquez, C. E.; Fortini, A.; SILVA, C. A. M.; PEREIRA, C. IMPACT OF BURNABLE POISON IN FUEL ELEMENT PWR WITH ZIRCALOY AND SILICON CARBIDE CLADDINGS. In: Global 2015, 2015, Paris. Nuclear Fuel Cycle for a Low-Carbon Future. Paris: SFEN, 2015. v. único. p. 1-8.
  
- **R. B. FARIA**; F. Cardoso; J. A. D. Salomé; SILVA, C. A. M. ; FORTINI, A.; PEREIRA, Cláudia. IMPACT OF SOLUBLE BORON IN FUEL ELEMENT PWR WITH ZIRCALOY AND SILICON CARBIDE CLADDINGS. In: TOP FUEL 2015, 2015, Zurique. Top Fuel 2015 - Reactor Fuel Performance. Bruxelas: European Nuclear Society, 2015. v. Único. p. 1-492.