AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESTUDO DE MODELOS PARA O COMPORTAMENTO A ALTAS QUEIMAS DE
VARETAS COMBUSTÍVEIS DE REATORES A ÁGUA LEVE PRESSURIZADA**

RAPHAEL MEJIAS DIAS

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

Orientador:

Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva

São Paulo

2016

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**ESTUDO DE MODELOS PARA O COMPORTAMENTO A ALTAS QUEIMAS DE
VARETAS COMBUSTÍVEIS DE REATORES A ÁGUA LEVE PRESSURIZADA**

RAPHAEL MEJIAS DIAS

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

Orientador:

Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2016

*Dedico este trabalho aos meus pais Gilmar e Margareth
pelo incondicional apoio que recebi.*

Agradecimentos

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP) pelo suporte apresentado com a disponibilização de espaço, equipamentos e aos professores da Comissão de Pós-graduação que foram fundamentais para o meu aprendizado.

Ao Professor Dr. Antonio Teixeira e Silva por sua orientação, paciência e generosa disponibilidade de tempo para a discussão de dúvidas e questionamentos, bem como sua dedicação e apoio, que foram valiosos para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos amigos da Universidade de São Paulo, Lucas Bizzaria Freitas, Otávio Luis De Oliveira, Pedro Russo Rossi e aos demais servidores do IPEN/CNEN-SP, do reator IPEN/MB-01 e demais colegas pelos conselhos, lições e principalmente pelo apoio, motivação dadas e as conversas produtivas.

À CAPES/ELETROBRAS ELETRONUCLEAR pelo apoio financeiro.

E, em especial, aos meus pais e familiares que sempre me apoiaram e acompanharam durante toda a minha vida e especialmente neste grande passo, que foi a conclusão deste trabalho.

*“Em algum remoto rincão do universo cintilante que se derrama
em um sem número de sistemas solares, havia uma vez um
astro, em que animais inteligentes inventaram o conhecimento.”*

Friedrich Nietzsche

ESTUDO DE MODELOS PARA O COMPORTAMENTO A ALTAS QUEIMAS DE VARETAS COMBUSTÍVEIS DE REATORES A ÁGUA LEVE PRESSURIZADA

Raphael Mejias Dias

Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar as modificações introduzidas, ao longo de sucessivas versões, nos modelos empíricos do programa computacional FRAPCON utilizado para a simulação do comportamento sob irradiação de varetas combustível de Reatores a Água Leve Pressurizada (*Pressurized Water Reactor* - **PWR**) em regime de estado estacionário e sob condições de alta queima.

No estudo, foram analisados os modelos empíricos utilizados pelo FRAPCON e que são apresentados em sua documentação oficial. Um estudo bibliográfico foi conduzido sobre os efeitos da alta queima em combustíveis nucleares visando melhorar o entendimento dos modelos utilizados pelo FRAPCON nestas condições.

Foram feitas simulações do comportamento sob irradiação de uma vareta combustível típica de um reator PWR utilizando as versões 3.3, 3.4 e 3.5 do FRAPCON. Os resultados apresentados pelas diferentes versões do programa foram comparados entre si de forma a verificar as consequências das mudanças de modelo nos parâmetros de saída do programa.

Foi possível observar que as modificações introduzidas trouxeram diferenças significativas nos resultados de parâmetros térmicos e mecânicos da vareta combustível, principalmente quando se evoluiu da versão FRAPCON-3.3 para a versão FRAPCON-3.5. Nessa última versão, obteve-se menores temperaturas na vareta combustível, menores tensões e deformações no revestimento, menor espessura da camada de óxido formada no revestimento a altas queimas na vareta combustível.

MODELING OF PWR FUEL AT EXTENDED BURNUP

Raphael Mejias Dias

Abstract

This work studies the modifications implemented over successive versions in the empirical models of the computer program FRAPCON used to simulate the steady state irradiation performance of Pressurized Water Reactor (PWR) fuel rods under high burnup condition.

In the study, the empirical models present in FRAPCON official documentation were analyzed. A literature study was conducted on the effects of high burnup in nuclear fuels and to improve the understanding of the models used by FRAPCON program in these conditions.

A steady state fuel performance analysis was conducted for a typical PWR fuel rod using FRAPCON program versions 3.3, 3.4 and 3.5. The results presented by the different versions of the program were compared in order to verify the impact of model changes in the output parameters of the program.

It was observed that the changes brought significant differences in the results of the fuel rod thermal and mechanical parameters, especially when they evolved from FRAPCON-3.3 version to FRAPCON-3.5 version. Lower temperatures, lower cladding stress and strain, lower cladding oxide layer thickness were obtained in the fuel rod analyzed with the FRAPCON-3.5 version.

Lista de Figuras

2.1	Microscopia eletrônica mostrando a estrutura da superfície do combustível: (a) UO_2 não irradiado; poros visíveis com sua estrutura original de fabricação retirado da irradiação ainda no estágio inicial do processo de densificação por radiação. (b) Combustível com queima local de $\sim 75\text{MWd/kgU}$ mostrando a estrutura de alta queima. Fonte: Rondinella e Wiss (2010).	6
2.2	Ceramografia de um corte transversal de uma pastilha combustível com queima média de $\sim 65\text{MWd/kgU}$: (a) Material não reestruturado de uma região radial intermediária. (b) Estrutura de alta queima na borda da pastilha combustível, onde a região preta à direita é a interface entre o combustível e o revestimento. Fonte: Rondinella e Wiss (2010).	7
2.3	Estrutura do combustível sob quatro posições radiais em uma secção do pino M1-3-11. (a) $r/r_0 = 0,84$; (b) $r/r_0 = 0,61$; (c) $r/r_0 = 0,45$; (d) $r/r_0 = 0,14$. Fonte: Mogensen <i>et al.</i> (1985).	8
2.4	Condutividade térmica de um combustível altamente queimado, em uma porção de $r/r_0 = 0,55$ antes e depois do recozimento. Fonte: Walker <i>et al.</i> (2006).	9
2.5	A difusividade térmica é influenciada pela estrutura de alta queima com um aumento de 50%. Fonte: Walker <i>et al.</i> (2006).	10
2.6	Condutividade térmica em função da queima do combustível e da temperatura nas faixas de 600, 900, 1200 e 1500K. Fonte: Ronchi <i>et al.</i> (2004).	11
2.7	Microestrutura do Zircaloy-4 oxidado nas seguintes temperaturas: (a) 700°C , (b) 800°C , (c) 900°C , (d) 1000°C , (e) 1100°C , (f) 1200°C . Fonte: Kim <i>et al.</i> (2010)	13
2.8	Microestrutura do ZIRLO TM oxidado nas seguintes temperaturas: (a) 700°C , (b) 800°C , (c) 900°C , (d) 1000°C , (e) 1100°C , (f) 1200°C . Fonte: Kim <i>et al.</i> (2010)	14
2.9	Ganho de massa específica de óxido para ligas de zircônio entre 700°C - 1200°C . Fonte: Steinbrück <i>et al.</i> (2011)	15
2.10	Hidrogênio absorvido pelos revestimentos de liga de zircônio durante o processo de oxidação em vapor em %. Fonte: Steinbrück <i>et al.</i> (2011)	16
2.11	Variação da tensão de escoamento em função da temperatura. Fonte: Cazalis <i>et al.</i> (2005)	17

3.1	Fluxograma simplificado de solução do FRAPCON. Fonte: Geelhood <i>et al.</i> (2014).	23
3.2	Fluxograma de solução da queda de temperatura no folga. Fonte: Geelhood <i>et al.</i> (2014).	24
3.3	Fluxograma completo do FRAPCON. Fonte: Geelhood <i>et al.</i> (2014).	25
5.1	Histórico de potência utilizado, Potência linear da vareta (kW/m) e Queima (MWd/kgU) em função do tempo de irradiação (dias). Fonte: Autor.	42
5.2	Espessura da camada de óxido formada em função da queima do combustível para o revestimento de M5 TM para o 3 ^o nó axial (nó do pico de potência). Fonte: Autor.	43
5.3	Espessura da camada de óxido formada em função da queima do combustível para o revestimento de Zircaloy-4 para o 3 ^o nó axial (nó do pico de potência). Fonte: Autor.	44
5.4	Espessura da camada de óxido formada em função da queima do combustível para o revestimento de ZIRLO TM para o 3 ^o nó axial (nó do pico de potência). Fonte: Autor.	44
5.5	Temperatura central do combustível, utilizando o revestimento de M5 TM . Fonte: Autor.	45
5.6	Gases de fissão liberados em função da queima do combustível utilizando o revestimento de M5 TM . Fonte: Autor.	46
5.7	Pressão interna da vareta combustível em função da queima do combustível utilizando o revestimento de M5 TM . Fonte: Autor.	47
5.8	Tamanho da folga em função da queima no revestimento M5 TM . Fonte: Autor.	48
5.9	Temperatura do revestimento M5 TM em função da queima. Fonte: Autor.	49
5.10	Deformação percentual do revestimento M5 TM em função da queima. Fonte: Autor.	50
5.11	Tensão circunferencial no revestimento M5 TM em função da queima. Fonte: Autor.	50

Lista de Tabelas

2.1	Composição de algumas ligas de zircônio com a fração em peso percentual dos elementos adicionados. Fonte: Steinbrück <i>et al.</i> (2011)	12
5.1	Parametros Termo Hidráulicos do Reator.	41
5.2	Descrição da Vareta Combustível Simulada.	41

Lista de Abreviaturas

°C	Grau Celsius (<i>Degree Celsius</i>)
ANS	<i>American Nuclear Society</i>
CRUD	Chalk River Undefined Deposition
FGR	Liberação de Gases de Fissão (<i>Fission Gas Release</i>)
Gd	Gadolínio (<i>Gadolinium</i>)
MWd/kgU	<i>Megawatt-Days Per kilograms Of Uranium</i>
He	Hélio (<i>Helium</i>)
HWR	Reator a Água Pesada (<i>Heavy Water Reactor</i>)
LWR	Reator a Água Leve (<i>Light Water Reactor</i>)
MOX	Combustível de Óxido Misto (<i>Mixed Oxide Fuel</i>) [(U, Pu)O ₂]
NFI	<i>Nuclear Fuel Industries</i>
NRC	<i>U.S. Nuclear Regulatory Commission</i>
PNNL	<i>Pacific Northwest National Laboratory</i>
ppm	Partes Por Milhão (<i>parts per million</i>)
Pu	Plutônio (<i>Plutonium</i>)
PWR	Reator a Água Pressurizada (<i>Pressurized Water Reactor</i>)
RXA	<i>Re-Crystallized Annealed</i>
SRA	<i>Stress Relief Annealed</i>
U	Urânio (<i>Uranium</i>)
UO ₂	Dióxido de Urânio (<i>Uranium Dioxide</i>)
UO ₂ – Gd ₂ O ₃	Dióxido de Urânio Óxido Gadolínio

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iii
Lista de Abreviaturas	iv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Efeitos das Altas Queimas nos Combustíveis Nucleares	4
2.1.1 Efeitos das Altas Queimas sobre a Pastilha de UO_2	5
2.1.1.1 Reestruturação do Combustível	5
2.1.1.2 Liberação e Acúmulo dos Gases De Fissão	7
2.1.1.3 Condutividade Térmica do Combustível	8
2.1.2 Efeitos das Altas Queimas sobre o Revestimento do Combustível	11
2.1.2.1 Efeito das Altas Queimas na Corrosão do Revestimento	12
2.1.2.2 Efeito das Altas Queimas na Hidretação do Revestimento	16
2.1.2.3 Efeito das Altas Queimas nas Propriedades Mecânicas do Revestimento	17
2.2 Códigos de Simulação Computacional	17
3 Código Computacional FRAPCON	19
3.1 Desenvolvimento da Série FRAPCON	19
3.2 Limitações dos Programas FRAPCON	20
3.2.1 FRAPCON-3.0	20
3.2.2 FRAPCON-3.3	20
3.2.3 FRAPCON-3.4	21
3.2.4 FRAPCON-3.5	21
3.3 Método de Solução do FRAPCON	22
4 Modelos e Modificações	26
4.1 Condições do Refrigerante	26
4.2 Condução Através da Interface de Gás	28

4.3	Condutância Através dos Pontos de Contato	29
4.4	Perfil Radial de Potência	30
4.5	Condutividade Térmica do Combustível	31
4.6	Fluência do Revestimento	32
4.7	Deformação Radial do Combustível	32
4.8	Realocação do Combustível	33
4.9	Modelo Modificado Forsberg-Massih	34
4.10	Modelo FRAPFGR	36
4.11	Volume de Vazio da Vareta Combustível	36
4.12	Modelos de Corrosão para PWR e BWR	36
4.13	Captura de Hidrogênio	38
5	Simulações com o Programa FRAPCON	40
5.1	Simulação Computacional	40
5.2	Dados da Vareta Combustível Utilizada	41
5.3	Comparação dos Resultados da Formação de Óxido de Zircônio	42
5.4	Comparação dos Resultados da Temperatura Central do Combustível	45
5.5	Comparação dos Resultados da Liberação dos Gases de Fissão e Pressão Interna da Vareta	46
5.6	Comparação dos Resultados do Tamanho da Folga Pastilha-Revestimento	47
5.7	Comparação dos Resultados da Temperatura Média do Revestimento	48
5.8	Comparação dos Resultados das Deformações e Tensões do Revestimento	49
6	Discussão dos Resultados e Conclusão	51
6.1	Trabalhos Futuros	52
A	Arquivo de Entrada do Programa FRAPCON-3	53
B	Arquivos de Saída do Programa FRAPCON-3	56
	Referências Bibliográficas	77

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, o mundo vem acompanhando uma crescente demanda por energia elétrica, seja para uso residencial ou industrial. Alguns países, por sua geografia, não podem contar com usinas hidrelétricas e a utilização de usinas termoeletricas queimando carvão têm gerado preocupações ambientais e demasiada poluição do ar.

As fontes alternativas de energia renovável, que surgiram como uma grande opção, ainda são tecnologias muito recentes e devido à sua própria qualidade de se aproveitar dos recursos naturais, como o vento e a luz solar, podem não estar disponíveis para o fornecimento de energia durante todo tempo.

A energia nuclear vem sendo muito utilizada ao redor do mundo. Alguns países, como Japão e França, por exemplo, ainda dependem muito da energia nuclear, sendo que diminuir os custos operacionais dessas usinas nucleares vem se tornando um ponto importante que tem sido procurado por países e governos do mundo todo.

Na década de sessenta, a queima do combustível nuclear nos Reatores Refrigerados a Água Leve Pressurizada (*Pressurized Water Reactors* - PWR) era de 20 MWd/kgU. Na década de setenta, a queima média dos PWR americanos foi de 33 MWd/kgU. Os ciclos médios atuais são de 18 meses e 47 MWd/kgU. A meta é alcançar 36 meses em um futuro próximo.

Visando minimizar os custos operacionais das plantas nucleares instaladas, há um movimento de governos e empresas que buscam, por meio de novas tecnologias, tanto no que tange ao projeto de novas usinas como também das plantas já existentes, maximizar a utilização dos combustíveis nucleares e o ponto chave desta abordagem é manter por mais tempo os elementos combustível nuclear em uso dentro do reator nuclear.

O aumento da queima foi atingido por meio do desenvolvimento contínuo dos materiais do combustível, especialmente revestimentos avançados, experimentação gradual e cuidadosa, e uma maior compreensão dos modelos que regem o comportamento do combustível sob irradiação. Existem, ainda, questões que envolvem o gerenciamento do combustível, propriedades neutrônicas e reprocessamento, ou de uma maneira geral, o gerenciamento de rejeitos de combustíveis altamente irradiados. Tempos de residência longos no núcleo e potências de operação mais elevadas tem acarretado na decomposição no combustível, gerando preocupações operacionais.

Um dos desafios tecnológicos atuais é a utilização de combustíveis para ciclos estendidos

de queima superiores a 45 MWd/kgU. Queimas de até 62 MWd/kgU estão se tornando comuns. Nos últimos anos, uma quantidade de trabalho considerável foi aplicada no estudo do comportamento do combustível sob irradiação a queimas elevadas e para modelá-lo em programas computacionais.

Prever com confiabilidade o comportamento sob irradiação de combustíveis do tipo vareta de reatores a água leve (*Light Water Reactors* - LWR) tem sido um dos maiores objetivos dos programas de pesquisa na área de segurança de reatores. Para atingir estes objetivos, a "*US Nuclear Regulatory Commission*" (US-NRC) fomentou um extenso desenvolvimento de programas computacionais (códigos), assim como testes "*in-pile*" e "*out of pile*" para validar a capacidade analítica destes códigos.

Um dos códigos desenvolvido com fomento da US-NRC para avaliar o comportamento de combustíveis LWR sob irradiação foi o FRAPCON-3 [Berna et al. \(1997\)](#), [Lanning et al. \(2005\)](#), [Geelhood et al. \(2011a\)](#) e [Geelhood et al. \(2014\)](#). O FRAPCON-3 é uma ferramenta analítica que avalia o comportamento sob irradiação de uma vareta combustível LWR, quando as variações de potência e as condições de contorno são suficientemente lentas para que o termo regime permanente seja aplicado. Isto inclui situações tais como longos períodos a potência constante e rampas lentas de potência que são típicas da operação normal de um reator nuclear. O código FRAPCON-3 calcula a variação no tempo de todas as variáveis significativas da vareta combustível, incluindo as temperaturas no combustível e no revestimento, deformações e oxidação no revestimento do combustível, densificação, inchamento, liberações de gases no combustível e pressão na vareta. Os combustíveis validados para este programa até queimas de 62 MWd/kgU incluem o UO_2 , o $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$ e o $\text{UO}_2 - \text{Gd}_2\text{O}_3$. Os revestimentos validados incluem Zircaloy-2, Zircaloy-4, M5^{TM} , Zirlo $^{\text{TM}}$ e mais recentemente o Zirlo otimizado. Além disso, o código é projetado para gerar as condições iniciais para a análise de transientes da vareta combustível pelo código FRAPTRAN [Geelhood et al. \(2011b\)](#).

O aumento na queima dos combustíveis tem gerado a necessidade de melhorar cada vez mais os modelos utilizados nos programas computacionais, principalmente em condições de transiente e acidente. No caso dos LWR, novos materiais, como, por exemplo, revestimentos avançados, têm sido utilizados. Uma preocupação maior nesta categoria de reatores tem sido, por exemplo, a liberação de produtos de fissão e a reestruturação do combustível induzida pela irradiação nas pastilhas combustível e a corrosão do revestimento da vareta combustível. O código FRAPCON vem constantemente recebendo melhorias com o propósito de mantê-lo atualizado junto aos novos materiais de revestimento usados e aos mais recentes dados de queima obtidos de combustíveis irradiados.

Este trabalho será dividido da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos efeitos das altas queimas no combustível nuclear e o que tem sido produzido na área de modelos empíricos.

O capítulo 3 apresenta um breve histórico do código FRAPCON, apresentando algumas de suas características e limitações.

O capítulo 4 apresenta um resumo sobre as modificações que foram feitas no código

FRAPCON nas versões 3.3, 3.4, 3.5 que é a mais recente disponível no IPEN-CNEN/SP.

O capítulo 5 descreve as simulações que foram efetuadas com o código FRAPCON, bem como a vareta combustível utilizada e também os gráficos com os resultados comparativos de cada versão.

No capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho e recomendação de trabalhos futuros.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar as modificações que tem sido feitas nos modelos empíricos utilizados pelas versões mais recentes do FRAPCON para mantê-lo atualizado frente aos novos materiais utilizados como revestimento do combustível e também frente aos dados experimentais obtidos a altas queimas atingidas pelos reatores nucleares.

O trabalho pretende analisar as versões FRAPCON-3.3, FRAPCON-3.4 e FRAPCON3.5 do FRAPCON, buscando nos manuais fornecidos para cada versão as modificações feitas nos modelos empíricos e, também juntamente com a literatura, entender os efeitos que regimes de altas queimas causam nos combustíveis nucleares.

Este trabalho também dá sequência a uma dissertação de mestrado Reis (2014) que verificou, através de comparações entre simulações com o FRAPCON e experimentos da base de dados FUMEX-III, o comportamento sob irradiação de varetas combustíveis de reatores PWR em regimes permanente e transiente a altas queimas.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

É fundamental para o futuro da energia nuclear que os reatores nucleares sejam máquinas cada vez mais seguras e rentáveis. Hoje em dia, a extensão operacional dos combustíveis nucleares tem sido vista como uma boa alternativa econômica para a operação dos reatores nucleares.

A segurança, por outro lado, é um quesito fundamental que corre no cerne da discussão sobre a operação dos reatores nucleares. Para que seja possível estender a vida útil dos elementos combustível de forma segura, simulações computacionais vem sendo muito utilizadas como uma forma de melhorar a segurança operacional dos reatores nucleares.

A alta queima traz alguns efeitos deletérios que são interligados de forma complexa e que comprometem o desempenho do combustível nuclear durante o prolongamento do seu uso, como documentando pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA - *International Atomic Energy Agency*) em um estudo sobre o impacto das altas queimas sobre os combustíveis nucleares [IAEA \(1993\)](#).

Efetuar testes em varetas combustível irradiadas é uma tarefa complicada e cara e posto que os efeitos da alta queima sobre os combustíveis nucleares podem comprometer a segurança operacional do reator, o investimento no desenvolvimento e certificação de códigos computacionais para simular o comportamento das varetas combustível durante seu período dentro de um reator nuclear é muito importante.

Este capítulo tem como objetivo elucidar o desenvolvimento no ramo dos códigos de simulação dos combustíveis nucleares e os efeitos da alta queima nos combustíveis nucleares.

2.1 Efeitos das Altas Queimas nos Combustíveis Nucleares

Em 1993, a IAEA preparou um material [IAEA \(1993\)](#) que procurava trazer luz sobre a alta queima dos combustíveis nucleares, discutindo e categorizando os efeitos da alta queima e o seu possível impacto no manuseio e na estocagem do material altamente ativado dentro das plantas nucleares. O documento também trouxe uma valiosa contribuição sobre o desempenho do combustível nuclear, dividindo os efeitos da alta queima, da seguinte forma:

- Efeitos sobre a pastilha de UO_2 : Reestruturação do combustível, liberação e acúmulo

dos gases de fissão e condutividade térmica do combustível.

- Efeitos sobre o revestimento: Corrosão, hidratação e propriedades mecânicas.

2.1.1 Efeitos das Altas Queimas sobre a Pastilha de UO_2

Quando submetido ao regime de altas queimas, a literatura trás três fenômenos importantes que afetam o desempenho da pastilha de UO_2 e que podem vir a limitar a vida útil do combustível. São eles: IAEA (1993) e Jernkvist e Massih (2004):

1. Reestruturação do combustível;
2. Liberação e acúmulo de gases de fissão;
3. Condutividade térmica do combustível.

2.1.1.1 Reestruturação do Combustível

A reestruturação do combustível de UO_2 é um importante efeito que ocorre durante os regimes de altas queimas. No combustível, o processo se inicia na borda ou aro periférico da pastilha combustível e é caracterizado pela subdivisão dos grãos, aumento da porosidade e diminuição dos gases na matriz do combustível Matzke (1995) e Spino *et al.* (1996). A microestrutura resultante do efeito de borda (*rim zone structure*) está também relacionada com um aumento da queima local e da taxa de fissão, ambos combinados com uma menor temperatura na borda da pastilha combustível. Para denominar o efeito da reestruturação nesta região foi proposto o nome "estrutura de alta queima" (*high-burnup structure*) por Lassmann *et al.* (1995).

A estrutura da alta queima começa a se formar quando a queima está entre 60 e 70 GWd/kgU com a subdivisão dos grãos na borda do combustível e também nos poros e bolhas próximas à superfície. Também, é observado que com a reestruturação ocorre uma diminuição do gás presente entre os poros para um quinto da quantidade presente anteriormente à estrutura de alta queima, quando os grãos estavam maiores Mogensen *et al.* (1999) e Walker *et al.* (1988).

O material totalmente reestruturado tem grãos com tamanhos entre 200-30 nm, ou seja muito menores que o tamanho do grão original que é de aproximadamente $10\mu\text{m}$ segundo Jernkvist e Massih (2004). A reestruturação do combustível na borda da pastilha hoje é atribuída ao acúmulo dos danos causados pela radiação e não pela geração de plutônio Rondinella e Wiss (2010).

O efeito da estrutura de alta queima que afeta a borda da pastilha pode afetar o comportamento do combustível, pois a estrutura de alta queima pode aumentar a liberação de gases de fissão atômicos ¹, a condutividade térmica pode ser degradada nos poros presentes no material reestruturado e a reestruturação do combustível pode mudar a forma como ocorre

¹ A liberação atômica de gases ocorre devido a colisão elástica entre fragmentos de fissão e átomos de gás dos produtos de fissão no combustível Olander (1976).

a deformação da pastilha, alterando a interação mecânica entre a pastilha e o revestimento (PCMI) [Jernkvist e Massih \(2004\)](#).

Na Figura 2.1, pode-se observar e comparar o estágio inicial do combustível, apenas densificado pela radiação em (a) e depois em (b) a estrutura de alta queima formada. Nota-se claramente a diminuição do tamanho dos grãos na pastilha combustível na região da borda onde ocorre a estrutura de alta queima.

(a)

(b)

Figura 2.1: Microscopia eletrônica mostrando a estrutura da superfície do combustível: (a) UO_2 não irradiado; poros visíveis com sua estrutura original de fabricação retirado da irradiação ainda no estágio inicial do processo de densificação por radiação. (b) Combustível com queima local de $\sim 75 \text{ MWd/kgU}$ mostrando a estrutura de alta queima. Fonte: [Rondinella e Wiss \(2010\)](#).

Pode-se observar na Figura 2.2 uma pastilha combustível com uma queima média de $\sim 65 \text{ MWd/kgU}$, onde em (a) Pode-se observar sua região radial intermediária, onde nota-se os grãos maiores e em (b) Observa-se a região da borda do combustível com grãos muito pequenos e a estrutura de alta queima formada.

Figura 2.2: Ceramografia de um corte transversal de uma pastilha combustível com queima média de $\sim 65 \text{ MWd/kgU}$: (a) Material não reestruturado de uma região radial intermediária. (b) Estrutura de alta queima na borda da pastilha combustível, onde a região preta à direita é a interface entre o combustível e o revestimento. Fonte: Rondinella e Wiss (2010).

2.1.1.2 Liberação e Acúmulo dos Gases De Fissão

Um dos mais importantes fatores que pode influenciar o desempenho dos combustíveis nucleares em reatores PWR é os gases de fissão, sobretudo os gases liberados em regimes de altas queimas Mogensen *et al.* (1985).

Os gases de fissão como o xenônio e o criptônio são produzidos durante o processo de fissão do urânio e do plutônio. Em um curto tempo de irradiação, pode-se observar a produção destes gases Jernkvist e Massih (2004). O xenônio também funciona como um absorvedor de nêutrons, sendo assim um veneno para a reação nuclear Lamarsh (1966).

O processo atômico, que é provocado pelo recuo direto dos fragmentos da fissão dentro de uma camada fina, cuja espessura é igual à distância penetrada por esses fragmentos, aproximadamente $10 \mu\text{m}$, tem um importante papel na liberação de gases de fissão. Deste modo, os átomos de gás formados próximos à superfície externa da pastilha combustível podem escapar para o volume vazio da vareta. Neste processo, os átomos colidem elasticamente com outros átomos causando também o seu escape Olander (1976). Estudo recentes, com dados obtidos por meio de estudos de varetas irradiadas, têm mostrado que com uma queima média de 40 MWd/kgU já ocorre uma grande produção e liberação de gases de fissão pelo processo atômico Jernkvist e Massih (2004).

Um efeito que contribui para a liberação dos gases de fissão atômico é a reestruturação do combustível e a formação da estrutura de alta queima Jernkvist e Massih (2004).

Quando ocorre a formação do efeito de borda (*rim zone structure*), as bolhas intergranulares podem ser expurgadas da matriz do UO_2 , devido a recristalização dos grãos, migrando para o volume livre da vareta combustível Jernkvist e Massih (2004).

O processo térmico também é um importante processo de produção e liberação de gases de fissão onde, devido à baixa solubilidade destes gases no UO_2 , ocorre a formação de bolhas entre os grãos do combustível. A radiação também pode induzir a re-solução do gás, estourando as bolhas e formando bolhas ainda menores, que podem ampliar a formação dos átomos de gás na solução. Estes átomos de gases difusos podem migrar por entre os contornos de grãos do combustível, formando bolhas muito pequenas e essas bolhas minúsculas podem se interligar formando uma rede de túneis e migrar para o volume livre do revestimento [Jernkvist e Massih \(2004\)](#).

Atualmente, acredita-se que a liberação de gases por processos térmicos na pastilha combustível tem como principal mecanismo a difusão de átomos gasosos via a interligação de túneis por entre o contorno dos grãos [Jernkvist e Massih \(2004\)](#).

Pode-se observar na Figura 2.3 uma micrografia que apresenta a formação dos poros das bolhas de gases entre os grãos do combustível.

Figura 2.3: Estrutura do combustível sob quatro posições radiais em uma secção do pino M1-3-11. (a) $r/r_0 = 0,84$; (b) $r/r_0 = 0,61$; (c) $r/r_0 = 0,45$; (d) $r/r_0 = 0,14$. Fonte: [Mogensen et al. \(1985\)](#).

2.1.1.3 Condutividade Térmica do Combustível

A condutividade térmica é um importante parâmetro no estudo do comportamento do combustível nuclear, pois a temperatura da pastilha, a expansão térmica, a liberação de gases por processo térmico, o crescimento dos grãos e o inchamento gasoso são fortemente afetados pela condutividade térmica da pastilha [Jernkvist e Massih \(2004\)](#).

Hoje, acredita-se que o mecanismo de degradação da condutividade é muito influenci-

ado pela formação dos produtos de fissão e dos pontos de defeitos no material da pastilha induzidos pela radiação Walker *et al.* (2006).

Por algum tempo, a estrutura de alta queima era tida como responsável pela deterioração da condutividade térmica, devido à sua estrutura altamente porosa Walker *et al.* (2006). Estudos mais recentes, como de Staicu *et al.* (2014), afirmam que a região compreendida como estrutura de alta queima na realidade apresenta uma melhor condutividade térmica.

A região da estrutura de alta queima, durante o processo de queima do combustível acaba sofrendo um tratamento por recozimento. Este processo deixa a região recozida livre de muito dos produtos de fissão sólidos, que são os átomos dos produtos de fissão, o que torna a estrutura de alta queima uma região com uma melhor condutividade térmica Walker *et al.* (2006).

A importância do recozimento está ligada à temperatura, como mostram os trabalhos de Ronchi *et al.* (2004) e Walker *et al.* (2006). Esta importância pode ser observada na Figura 2.4, que mostra a relação entre a condutividade térmica e a temperatura.

Figura 2.4: Condutividade térmica de um combustível altamente queimado, em uma porção de $r/r_0 = 0,55$ antes e depois do recozimento. Fonte: Walker *et al.* (2006).

A presença da estrutura de alta queima melhora a difusividade térmica em até 50% como mostra o estudo de Walker *et al.* (2006), que levou a queima local do combustível até 100 MWd/kgU . Na Figura 2.5, é possível notar que a queda na difusividade térmica é acentuada com a formação da estrutura de alta queima.

Figura 2.5: A difusividade térmica é influenciada pela estrutura de alta queima com um aumento de 50%. Fonte: Walker *et al.* (2006).

Na Figura 2.6, pode-se observar de forma mais clara a influência da temperatura e da queima do combustível na condutividade térmica. As faixas de recozimento foram de 600, 900, 1200 e 1500K. A Figura 2.6 mostra que a condutividade térmica diminui com o aumento da queima do combustível e também da temperatura.

Figura 2.6: Condutividade térmica em função da queima do combustível e da temperatura nas faixas de 600, 900, 1200 e 1500 K. Fonte: Ronchi *et al.* (2004).

2.1.2 Efeitos das Altas Queimas sobre o Revestimento do Combustível

As ligas de zircônio são largamente utilizadas na indústria nuclear devido a suas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Outra vantagem também muito importante é a sua baixa secção de choque para absorver nêutrons térmicos, o que melhora a economia de nêutrons dos reatores de água leve. Mesmo sendo um material resistente, o revestimento de zircônio do combustível é afetado pelas condições de altas queimas. Os níveis de oxidação, a absorção de hidrogênio, juntamente com a deterioração das propriedades mecânicas afetam os materiais utilizados no revestimento Adamson *et al.* (2003).

Os efeitos da alta queima sobre o revestimento do combustível como nas ligas de zircônio podem ser sumarizados da seguinte forma:

1. Efeitos sobre a corrosão do revestimento;
2. Efeitos sobre a captura de hidrogênio nas ligas de zircônio;

3. Efeitos sobre as propriedades mecânicas do revestimento.

2.1.2.1 Efeito das Altas Queimas na Corrosão do Revestimento

A oxidação do revestimento é um processo constante e contínuo durante a permanência do combustível no reator nuclear, visto que a água do líquido refrigerante é a grande responsável pela formação do óxido na parte externa da vareta.

Alguns estudos têm sido desenvolvidos com a finalidade de buscar um melhor entendimento sobre o processo de corrosão e sua aceleração durante as altas queimas como mostra [Jernkvist e Massih \(2004\)](#). Este trabalho sugere que o aumento na taxa de corrosão durante regimes de altas queimas pode estar associado à precipitação de hidretos na interface óxido-metal, que perturba a coesão do material nesta interface.

Os estudos das novas ligas de Zircônio como o ZIRLOTM fabricado pela Westinghouse, do Duplex e do M5TM fabricados pela AREVA e do E110 fabricado pela Electrostal, são exemplos de materiais que vem sendo desenvolvidos hoje em dia e estão obtendo êxito na diminuição da oxidação do revestimento [Steinbrück et al. \(2011\)](#).

Estes novos materiais buscam reduzir a quantidade de ferro e estanho em sua composição. Alguns fabricantes estão adicionando o nióbio em suas ligas, como é caso do M5TM e do E110, e estas mudanças têm sido associadas a uma melhora do desempenho destas novas ligas frente à oxidação como apresentado em [Kim et al. \(2010\)](#), [Steinbrück et al. \(2011\)](#) e [Garner e Mardon \(2011\)](#).

O desempenho do revestimento e o aumento da oxidação em uma atmosfera de vapor também tem sido focos de estudo, pois durante um acidente de perda do refrigerante (LOCA) uma mudança no comportamento do processo de oxidação pode levar a uma falha do revestimento do combustível [Kim et al. \(2010\)](#).

Outra questão importante pertinente a oxidação das ligas de zircônio é a influência da temperatura no processo de formação do óxido, pois acima de 1000°C o processo passa por rápida aceleração [Kim et al. \(2010\)](#). A temperatura também afeta a quantidade de óxido formada como apresentado por [Steinbrück et al. \(2011\)](#).

Na Tabela 2.1 é apresentada a composição de algumas das ligas de zircônio, que vem sendo investigadas por apresentarem uma menor oxidação do revestimento.

Liga	Nb	Sn	Fe	Cr	O
Zr-4	-	1,5	0,2	0,1	0,14
Duplex	-	0,5	0,5	0,2	0,14
M5	1	-	0,05	0,02	0,14
E110	1	-	0,008	0,002	0,05
Zirlo	1	-	0,1	<0,01	0,11

Tabela 2.1: Composição de algumas ligas de zircônio com a fração em peso percentual dos elementos adicionados.
Fonte: [Steinbrück et al. \(2011\)](#)

O trabalho de [Kim et al. \(2010\)](#) efetuou testes de oxidação no Zircaloy-4 e no ZIRLOTM em condições de vapor, em seis faixas de temperatura entre 700°C e 1200°C. Na Figura 2.7 pode-se observar a evolução do perfil de oxidação do Zircaloy-4, onde estão destacadas

as fases α e β do zircônio. Pode-se observar que a oxidação reduziu a espessura da faixa central densa no item (a) para uma região com muito óxido formado no item (f). Na Figura 2.8, pode-se observar o perfil da oxidação para o ZIRLO[™], demonstrando a degradação da sua microestrutura, onde no item (a) observa-se uma região densa, e já no item (f) pode-se observar as mudanças de fase do zircônio oxidado, mostrando sua mudança de fase.

Figura 2.7: Microestrutura do Zircaloy-4 oxidado nas seguintes temperaturas: (a) 700°C, (b) 800°C, (c) 900°C, (d) 1000°C, (e) 1100°C, (f) 1200°C. Fonte: Kim et al. (2010)

Figura 2.8: Microestrutura do ZIRLO[™] oxidado nas seguintes temperaturas: (a) 700°C, (b) 800°C, (c) 900°C, (d) 1000°C, (e) 1100°C, (f) 1200°C. Fonte: *Kim et al. (2010)*

A Figura 2.9 apresenta as curvas da massa específica do óxido formado em função de tempo, para o intervalo de temperaturas entre 700°C e 1200°C sob atmosfera de vapor para alguns materiais de revestimentos. Pode-se observar na Figura como se comportam os

materiais de revestimento diante do processo de oxidação.

Figura 2.9: Ganho de massa específica de óxido para ligas de zircônio entre 700 °C-1200 °C. Fonte: Steinbrück et al. (2011)

2.1.2.2 Efeito das Altas Queimas na Hidretação do Revestimento

A corrosão do revestimento pela água do líquido refrigerante também leva a um substancial aumento da quantidade de hidrogênio presente na liga de zircônio, pois durante o processo de oxidação ocorre a liberação de hidrogênio *IAEA et al. (1998)*. Este processo pode ser descrito de forma simplificada como:

Embora grande parte do hidrogênio produzido acabe dissolvido no líquido refrigerante, uma certa fração é capturada pelo revestimento *Jernkvist e Massih (2004)*.

Para os revestimentos de ZIRLOTM estudos demonstraram que a fração da captura de hidrogênio é muito próxima do Zircaloy-4 com baixo teor de estanho, ficando em aproximadamente 0,12-0,14 *Jernkvist e Massih (2004)*

O revestimento de M5TM possui uma baixa captura de hidrogênio quando comparado às outras ligas recentemente desenvolvidas, sendo que sua fração de captura fica próxima dos 0,06 *Jernkvist e Massih (2004)*.

A interligação entre o processo de hidretação e a oxidação, sendo esta última ainda dependente da temperatura, torna a captura de hidrogênio um processo de natureza complexa.

Na Figura 2.10, pode-se observar a variação da captura de hidrogênio em função da temperatura de algumas ligas de zircônio, a hidretação sofrida por cada material de revestimento pode ser comparada. O M5TM aparece com a menor hidretação e o Zircaloy-4 com uma das maiores quantidades de hidrogênio absorvidos.

Figura 2.10: Hidrogênio absorvido pelos revestimentos de liga de zircônio durante o processo de oxidação em vapor em %. Fonte: *Steinbrück et al. (2011)*

2.1.2.3 Efeito das Altas Queimas nas Propriedades Mecânicas do Revestimento

O processo de irradiação da vareta do combustível leva a uma mudança progressiva nas propriedades mecânicas do revestimento, causada pelo acúmulo dos danos causados pela radiação, bem como pela oxidação e pela captura de hidrogênio [Jernkvist e Massih \(2004\)](#).

O hidrogênio capturado pelo revestimento afeta a ductilidade do material, o que torna a liga do zircônio mais quebradiça, perdendo sua plasticidade [Jernkvist e Massih \(2004\)](#) e [Jacobs e Todreas \(1973\)](#).

A tensão de escoamento do material fragilizado diminui muito, tornando o material frágil. Como consequência, a vareta combustível pode ser mais suscetível a falhas, como se observa na Figura 2.11, onde é apresentada a tensão de escoamento em função da temperatura de vários tipos de revestimentos oxidados e testar a altas queimas.

Figura 2.11: Variação da tensão de escoamento em função da temperatura. Fonte: [Cazalis et al. \(2005\)](#)

2.2 Códigos de Simulação Computacional

A revisão bibliográfica apresentada buscou referenciar e trazer informações relevantes quanto às mudanças no comportamento dos combustíveis nucleares expostos a alta queima.

As pastilhas combustível e o revestimento são levados a um grande nível de estresse e efeitos que degradam as condições do combustível começam a surgir de forma interligada de maneira complexa.

Frente à complexidade de se estimar o comportamento de uma vareta combustível durante seu uso dentro do reator nuclear, foram desenvolvidos alguns códigos computacionais que

apresentam modelos empíricos do comportamento das variáveis envolvidas nas alterações do combustível nuclear e do revestimento durante a queima.

Pode-se citar alguns códigos que foram desenvolvidos até os dias de hoje e tem sido melhorados frente às pesquisas feitas sobre as altas queimas dos combustíveis, como por exemplo o Transuranus [Lassmann *et al.* \(1998b\)](#), Dionisio [Soba e Denis \(2015\)](#) e o FRAPCON [Berna *et al.* \(1997\)](#).

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) escolheu participar do programa FRAPCON mantido pela US-NRC, assim recebendo o código computacional e suas atualizações e documentação.

Visto que o IPEN-CNEN/SP como braço da CNEN também tem acesso a este código, o FRAPCON será alvo deste estudo sobre as modificações sofridas nos seus modelos frente às recentes pesquisas sobre altas queimas em suas versões mais recentes.

Capítulo 3

Código Computacional FRAPCON

No presente capítulo, é feito um breve histórico da série FRAPCON, contando um pouco sobre a motivação que levou a US-NRC a manter o desenvolvimento do código, bem como descrever algumas das limitações do código desde a versão 3.0.

3.1 Desenvolvimento da Série FRAPCON

Desde que a U.S. Nuclear Regulatory Commission (US-NRC) foi fundada em 1975, o desenvolvimento de códigos relacionados ao estudo do desempenho dos combustíveis nucleares tem sido uma das suas mais importantes preocupações. Atualmente, a agência americana patrocina a série FRAPCON e FRAPTRAN como parte do seu programa de pesquisa sobre a segurança da operação de reatores nucleares [Berna et al. \(1997\)](#).

Os códigos desenvolvidos são utilizados pela agência como parte do processo para o licenciamento de código para uso comercial desenvolvido por empresas da área nuclear. Os códigos de distribuidores comerciais, para a análise e simulação de varetas combustível, devem obter resultados compatíveis com os obtidos pelo FRAPCON para serem então licenciados pela US-NRC. [Berna et al. \(1997\)](#).

O desenvolvimento do FRAPCON foi um esforço conjunto entre o *Idaho National Laboratory* (INL, antigo INEEL) e o *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL) que no passado lançaram o FRAPCON-1 utilizando como base o código FRAP-S3 desenvolvido pelo INL como em [Berna et al. \(1997\)](#). O objetivo do programa FRAPCON tem sido calcular com precisão o comportamento sob irradiação de uma vareta combustível de Reatores a Água Leve sob estado estacionário.

O FRAPCON-3 foi primeiro escrito na linguagem de computadores FORTRAN IV para ser utilizado em estações de trabalho baseadas no sistema operacional UNIX como a DEC 5000 ou o SUN Sparcstation 10 [Berna et al. \(1997\)](#). Atualmente, o FRAPCON é escrito na linguagem de computadores FORTRAN 90 [Geelhood et al. \(2014\)](#). O código calcula as temperaturas, pressão e as deformações de uma vareta combustível em função do tempo, da potência e da condição do líquido refrigerante. Os fenômenos modelados pelo código incluem a condução de calor através do revestimento do combustível, deformação plástica e elástica do revestimento, interação mecânica entre a pastilha e o revestimento, liberação de gases,

pressão interna da vareta combustível, transferência de calor entre a pastilha combustível e o revestimento, oxidação do revestimento e a transferência de calor entre o revestimento e o refrigerante. O pacote também inclui o FRAPT-6 (hoje FRAPTRAN) para cálculo de comportamento do combustível sob regime de transientes [Berna *et al.* \(1997\)](#).

3.2 Limitações dos Programas FRAPCON

As versões do FRAPCON foram sendo melhoradas ao longo do tempo, visando a alcançar sempre um melhor resultado em suas simulações, e muito embora o código funcione bem, ele tem algumas limitações, como por exemplo limite máximo de queima, potência máxima por iteração, revestimentos suportados etc. Abaixo, segue a lista de algumas limitações da série FRAPCON por versão.

3.2.1 FRAPCON-3.0

O código FRAPCON-3.0 [Berna *et al.* \(1997\)](#) disponibilizado em 1997 teve como intenção substituir a série FRAPCON-2. Foi originalmente desenvolvido para ser utilizado em computadores com sistema operacional baseado em UNIX e escrito na linguagem de programação de computadores FORTRAN-IV. Abaixo, tem-se algumas das limitações e características desta versão do código:

1. Modelo térmico para cálculo apenas do fluxo radial, mudanças na geração de calor linear não devem exceder $1,5 \frac{kW}{ft}$ entre cada iteração, sendo que cada iteração temporal deve ser maior ou igual a 0,1 dia e menor ou igual a 50 dias [Berna *et al.* \(1997\)](#);
2. Apenas pequenas deformações do revestimento ($< 5\%$ de deformação) são significativas e nenhuma validação do comportamento do revestimento foi feita para temperaturas acima de 700 K ou com a temperatura do centro do combustível na temperatura de fusão ou acima. [Berna *et al.* \(1997\)](#);
3. A capacidade de avaliar as deformações no revestimento resultantes da interação mecânica pastilha-revestimento não foi validada. [Berna *et al.* \(1997\)](#);
4. O código só foi verificado para pastilhas combustível de UO_2 para uma queima de até $65 \frac{MWd}{kgU}$ [Berna *et al.* \(1997\)](#).

3.2.2 FRAPCON-3.3

A série FRAPCON-3.3 [Lanning *et al.* \(2005\)](#) trouxe algumas melhorias para a série FRAPCON, como por exemplo, a utilização de novos materiais de revestimento e o cálculo de combustíveis MOX. Tem-se abaixo as suas melhorias e limitações:

1. Adicionado o combustível PuO_2-UO_2 (MOX);
2. Adicionados os materiais de revestimento ZIRLO™ e M5™;

3. Cálculo para a temperatura do combustível e liberação de gases em pastilhas de UO_2 com bons resultados até $62 \frac{MWd}{kgU}$;
4. Cálculo para a temperatura do combustível e liberação de gases em pastilhas de MOX com bons resultado até $65 \frac{MWd}{kgU}$.

3.2.3 FRAPCON-3.4

O FRAPCON.3-4 Geelhood *et al.* (2011a) teve seu programa fonte adaptado para o uso em computadores com o sistema operacional Windows. A linguagem de programação de computadores utilizada passou a ser o FORTRAN 90. Abaixo, tem-se modificações e limitações desta versão:

1. Adicionado o combustível UO_2 - Gd_2O_3 ;
2. Código validado para operação com pastilhas de UO_2 até $62 \frac{GWd}{MTU}$;
3. Resultados da interação mecânica entre a pastilha e o revestimento, com testes de rampa de potência apresentados pelo FRAPCON-3.4 e que foram verificados contra dados experimentais, mostraram que o código superestima os valores da tensão no revestimento para queimas de até $45 \frac{GWd}{MTU}$. Também, foi observado que os resultados apresentados pelo código e que foram verificados contra os dados limitados de altas queimas, tem sugerido que o código pode subestimar os valores para a tensão do revestimento em rampas de potência sob alta queima, maior que $55 \frac{GWd}{MTU}$ por um tempo maior que 30 minutos.

3.2.4 FRAPCON-3.5

O FRAPCON-3.5 Geelhood *et al.* (2014) incorporou o revestimento de ZIRLO™ otimizado e algumas modificações nos seus limites de operação, como segue abaixo:

1. O código está limitado a calcular combustíveis com pastilhas MOX cuja fração em peso de PuO_2 ou Gd_2O_3 seja menor que 10% do peso de UO_2 ;
2. Resultados da interação mecânica entre a pastilha e o revestimento, com testes de rampa de potência apresentados pelo FRAPCON-3.4 e que foram verificados contra dados experimentais, mostraram que o código superestima os valores da tensão do revestimento para queimas de até $65 \frac{GWd}{MTU}$. Também foi observado que os resultados apresentados pelo código e que foram verificados contra os dados limitados de altas queimas, sugere que o código pode subestimar os valores para a tensão do revestimento em rampas de potência sob alta queima, maior que $65 \frac{GWd}{MTU}$ por um tempo maior que 30 minutos.

3.3 Método de Solução do FRAPCON

O código computacional FRAPCON analisa, no decorrer do tempo, o comportamento de uma vareta combustível. Para obter a solução, o programa utiliza um algoritmo interligado entre os modelos e também entre os laços de convergência que levam ao valor final.

O programa analisa os fenômenos que mais influenciam no desempenho da vareta combustível. As análises incluem os seguintes variáveis:

- Oxidação do revestimento;
- Temperatura no combustível e no revestimento;
- Inchamento e densificação do combustível devido à irradiação;
- Pressão interna da vareta combustível;
- Liberação de gases de fissão;
- Tensões no revestimento.

Internamente, o FRAPCON é dividido em quatro módulos operacionais que por sua vez são divididos em: (1) módulo de rotinas e de propriedades físicas dos materiais, (2) módulo para análise térmica da pastilha combustível e revestimento, (3) módulo para análise mecânica do revestimento e (4) módulo para o cálculo da liberação de gases de fissão e pressão interna da vareta.

Basicamente, estes módulos executam os cálculos que cabem às suas funções e enviam os resultados para os módulos dependentes.

O fluxo de cálculo inicia pelo processamento do arquivo de entrada, onde as informações da vareta combustível são interpretadas. O passo seguinte é determinar o estado inicial da vareta utilizando os dados de entrada fornecidos.

O comportamento do aumento da potência e dos intervalos de tempo segue conforme as informações contidas no arquivo de entrada e o processo de solução em estado estacionário ocorre em função destas informações e a cada intervalo de tempo. Um novo estado da vareta combustível é determinado e estes valores então assumem a condição inicial para o novo passo de cálculo. O número re-iterações que o processo de solução é repetido é especificado pelo número de incrementos de tempo definido no arquivo de entrada [Jernkvist e Massih \(2002\)](#).

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma simplificado da estrutura lógica de solução, que inicia com a leitura do arquivo e segue por entre os laços iterativos até que uma solução seja obtida.

Figura 3.1: Fluxograma simplificado de solução do FRAPCON. Fonte: Geelhood et al. (2014).

Pode-se observar do fluxograma da Figura 3.1 a execução do laço de cálculo externo da pressão do gás.

O laço externo, que obtém a pressão de gás, realiza a cada ciclo o cálculo do número de mols de gás que é utilizado para atualizar o valor da pressão interna da vareta combustível. Este procedimento do laço é repetido até que aja a convergência da pressão interna da vareta, ou seja, quando a diferença entre as duas últimas iterações for menor que 1% Geelhood et al. (2014) e Jernkvist e Massih (2002).

O laço interno, que compreende o processo de iteração da temperatura da folga entre a pastilha e o revestimento, determina inicialmente a distribuição de temperaturas na pastilha combustível bem como no revestimento. Esta distribuição é, então, utilizada para determinar a deformação causada pela expansão térmica do combustível e do revestimento.

A partir dos dados obtidos pelo laço de iteração da temperatura da folga entre a pastilha e o revestimento, determina-se um novo valor para a folga entre a pastilha combustível e o revestimento. Este valor é utilizado, então, para calcular o novo valor de condutância da

interface entre a pastilha e o revestimento. Este laço se repete até que os ciclos apresentem a mesma queda de temperatura na interface [Jernkvist e Massih \(2002\)](#).

A Figura 3.2, apresenta detalhadamente o laço de iteração utilizado no processo de obtenção da solução que determina a queda de temperatura e condutância da folga entre a pastilha e o revestimento.

Figura 3.2: Fluxograma de solução da queda de temperatura no folga. Fonte: [Geelhood et al. \(2014\)](#).

A Figura 3.3 apresenta o diagrama completo do funcionamento interno do FRAPCON.

Figura 3.3: Fluxograma completo do FRAPCON. Fonte: Geelhood et al. (2014).

Capítulo 4

Modelos e Modificações

Neste capítulo, são apresentadas as modificações feitas nos modelos de cálculo utilizados pelo código FRAPCON durante a evolução das versões do código. Tais alterações vem sendo feitas para que o programa possa estar de acordo com os dados mais recentes e também suportar novos materiais de revestimento.

Para identificar as modificações e diferenças entre os modelos de cada versão do código, foi feito um exaustivo trabalho de comparação da documentação de cada versão do FRAPCON, assim foi possível localizar cada modificação.

4.1 Condições do Refrigerante

O modelo utilizado para calcular as condições da temperatura do líquido refrigerante no FRAPCON-3 teve sua forma de cálculo do calor específico modificada. A partir da versão 3.4, as constantes utilizadas nas equações foram modificadas.

No FRAPCON-3 tem-se a seguinte forma de cálculo descrita em [Berna *et al.* \(1997\)](#):

$$C_p = 2,4 \times 10^5 \left(\frac{J}{kg} \right) \quad \text{para} \quad T_b(z) < 544K \quad (4.1)$$

$$C_p = 2,4 \times 10^5 [1 + 2,9 \times 10^{-3} (1,8 T_b(z) - 1031)] \quad \text{para} \quad 544K \leq T_b(z) < 588K \quad (4.2)$$

$$C_p = 2,4 \times 10^5 [1 + 2,9 \times 10^{-3} (1,8 T_b(z) - 979,4)] \quad \text{para} \quad T_b(z) \geq 588K \quad (4.3)$$

No FRAPCON-3.4 as constantes utilizadas para o cálculo da calor específico foram mudadas, bem como os limites de cada equação para a seguinte forma descrita em ([Geelhood *et al.* \(2011a\)](#)):

$$C_p = 2,39 \times 10^5 \left(\frac{J}{kg} \right) \quad \text{para} \quad T_b(z) < 544K \quad (4.4)$$

$$C_p = 2,39 \times 10^5 [1 + 7,73 \times 10^{-4} (1,8T_b(z) - 979,4)] \quad \text{para} \quad 544K \leq T_b(z) < 583K \quad (4.5)$$

$$C_p = 2,39 \times 10^5 [1 + 2,95 \times 10^{-3} (1,8T_b(z) - 1031)] \quad \text{para} \quad T_b(z) \geq 583K \quad (4.6)$$

O calor específico é utilizado dentro da equação do modelo da condição do refrigerante, que calcula a temperatura do líquido refrigerante em uma dada elevação ao longo do comprimento da vareta combustível.

A equação da condição do refrigerante é a seguinte [Geelhood et al. \(2011a\)](#):

$$T_z(z) = T_{in} + \int_0^z \left[\frac{(\pi D_0) + q''(z)}{C_p G A_f} \right] dz \quad (4.7)$$

Onde:

- $T_b(z)$ = Temperatura do refrigerante a uma elevação z do comprimento da vareta (K)
- T_{in} = Temperatura de entrada do refrigerante (K)
- $q''(z)$ = Fluxo de calor na superfície da vareta no comprimento z da vareta (W/m^2)
- C_p = Calor específico do refrigerante (J/kg-K)
- G = Vazão do líquido refrigerante ($kg/s - m^2$)
- A_f = Área do canal de escoamento do refrigerante (m^2)
- D_o = Diâmetro externo do revestimento (m)

A temperatura do líquido refrigerante ao longo do comprimento da vareta combustível $T_b(z)$ é utilizada dentro do modelo que calcula a temperatura da superfície da vareta combustível ao longo de seu comprimento [Geelhood et al. \(2011a\)](#). Este modelo tem duas formas internas para calcular a temperatura na superfície da vareta, sendo que o valor final é o menor valor entre as duas expressões abaixo, onde apenas a primeira considera a condição do refrigerante $T_b(z)$:

$$T_w(z) = T_b(z) + \Delta T_f(z) + \Delta T_{cr}(z) + \Delta T_{ox}(z) \quad (4.8)$$

$$T_w(z) = T_{sat}(z) + \Delta T_{JL}(z) + \Delta T_{ox}(z) \quad (4.9)$$

Onde:

$T_w(z)$	= Temperatura do revestimento a uma elevação z do comprimento da vareta (K)
$T_b(z)$	= Temperatura do refrigerante a uma elevação z do comprimento da vareta (K)
$\Delta T_f(z)$	= Queda de temperatura da camada de líquido a uma elevação z (K)
$\Delta T_{cr}(z)$	= Queda de temperatura na região do "crud" a uma elevação z (K)
$\Delta T_{ox}(z)$	= Queda da temperatura na camada de óxido a uma elevação z
$T_{sat}(z)$	= Temperatura de saturação do refrigerante (K)
$\Delta T_{JL}(z)$	= Queda da temperatura da ebulição nucleada a uma elevação z (K) determinada pela correlação de Jens-Lottes

4.2 Condução Através da Interface de Gás

O modelo que calcula a condutância devido à condutividade através do gás dentro do revestimento do combustível não teve sua expressão alterada, mas um coeficiente utilizado pelo modelo GAPCON-2, que fornece um parâmetro para a função que calcula a condução através da interface de gás foi mudado no FRAPCON-3.5.

O valor calculado para a condução através da interface de gás é utilizado pelo modelo que calcula o gradiente de temperatura entre o combustível e o revestimento no código FRAPCON.

A modificação que foi feita no modelo GAPCON-2 foi na constante A , que foi modificada de $A=0,7816$ como descrito em sua documentação [Geelhood *et al.* \(2011a\)](#) para $A=0,0137$ descrito em [Geelhood *et al.* \(2014\)](#).

O modelo para a condução através da interface de gás tem a seguinte expressão:

$$h_{gas} = \frac{k_{gas}}{\Delta x} \quad (4.10)$$

Onde:

k_{gas}	= Condutividade térmica do gás (W/m-K)
Δx	= Largura efetiva da folga entre a pastilha e o revestimento (m)

Sendo:

$$\Delta x = d_{eff} + 1,8(g_f + g_c) - b + d \quad (4.11)$$

Onde:

d	= Valor do FRACAS para a folga entre a pastilha e o revestimento (m)
d_{eff}	= $\exp(-0,0125P) + (R_f + R_c)$ para a folga fechada (m)
d_{eff}	= $(R_f + R_c)$ para a folga aberta
P	= Pressão interfacial entre o revestimento e o combustível (kg/cm^2)
$R_f + R_c$	= Rugosidade da superfície do combustível mais a rugosidade do revestimento
$(g_f + g_c)$	= Distância do salto de temperatura na superfície do combustível e do revestimento (m)
b	= $1,397 \times 10^{-6}$

A grandeza $(g_f + g_c)$ é calculada pelo GAPCON-2 e sua expressão segundo Geelhood *et al.* (2011a) é a seguinte:

$$(g_f + g_c) = A \left[\frac{k_{gas} \sqrt{T_{gas}}}{P_{gas}} \right] \left[\frac{1}{\sum a_i f_i / \sqrt{M_i}} \right] \quad (4.12)$$

Onde:

- A = 0,7816 no FRAPCON-3.4 Geelhood *et al.* (2011a) e 0,0137 no FRAPCON-3.5 Geelhood *et al.* (2014)
- k_{gas} = Condutividade do gás (W/m-K)
- P_{gas} = Pressão do gás (Pa)
- T_{gas} = Temperatura média do gás (K)
- a_i = Coeficiente de acomodação do componente i-ésimo do gás
- M_i = Peso molecular do coeficiente i-ésimo de acomodação do gás (g moles)
- f_i = Fração em mole do componente i-ésimo do gás

4.3 Condutância Através dos Pontos de Contato

O modelo da condutância através dos pontos de contato na série FRAPCON-3 Geelhood *et al.* (2011a) e Geelhood *et al.* (2014) é uma modificação do modelo de Mikic-Todreas. Ele preserva as dependências da rugosidade, da condutividade e da pressão enquanto fornece uma faixa de condutâncias de contato com a melhor estimativa medida por Garnier e Begej. O modelo FRACAS-I usa expressões para $h_{sólido}$ que depende da pressão interfacial entre combustível e revestimento e da rugosidade microscópica R .

O valor calculado por este modelo é utilizado pelo modelo FRACAS-I e também pelo modelo que calcula o gradiente de temperatura entre o combustível e o revestimento.

O FRAPCON-3.3, as equações são da seguinte forma:

$$h_{sólido} = \frac{5,0 K_m P_{rel} R_{mult}}{RE}, \quad se \quad P_{rel} > 0,003 \quad (4.13)$$

$$h_{sólido} = \frac{0,015 K_m}{RE}, \quad se \quad 0,003 > P_{rel} > 9 \times 10^{-6} \quad (4.14)$$

$$h_{sólido} = \frac{0,015 K_m P_{rel}^{0,5}}{RE}, \quad se \quad P_{rel} < 9 \times 10^{-6} \quad (4.15)$$

$$E = \exp[5,738 - 0,528 \ln(R_2)] \quad (4.16)$$

No FRAPCON-3.4 Geelhood *et al.* (2011a) e nas versões posteriores, as constantes foram

mudadas para as seguintes expressões:

$$h_{sólido} = \frac{0,4166K_m P_{rel} R_{mult}}{RE}, \quad se \quad P_{rel} > 0,003 \quad (4.17)$$

$$h_{sólido} = \frac{0,00125K_m}{RE}, \quad se \quad 0,003 > P_{rel} > 9 \times 10^{-6} \quad (4.18)$$

$$h_{sólido} = \frac{0,4166K_m P_{rel}^{0,5}}{RE}, \quad se \quad P_{rel} < 9 \times 10^{-6} \quad (4.19)$$

$$E = \exp[5,738 - 0,528 \ln(3,937 \times 10^7 R_f)] \quad (4.20)$$

Onde para ambos os modelos acima temos:

- P_{rel} = Razão entre a pressão interfacial e a dureza Meyer do revestimento ($\approx 680 MPa$)
- K_m = Média geométrica da condutividade: $2K_f K_c / (K_f + K_c)$ (W/m-K)
- R = $\sqrt{R_f^2 + R_c^2}$ (m), onde R_f e R_c são a rugosidade do combustível e do revestimento (m)
- R_{mult} = $333,3 P_{rel}$ se $P_{rel} \leq 0,0087$ ou $2,9$ se $P_{rel} > 0,0087$
- K_c = Condutividade térmica do revestimento (W/m-K)
- K_f = Condutividade térmica do combustível (W/m-K)
- E = $\exp[5,738 - 0,528 \ln(3,937 \times 10^7 R_f)]$
- $R2$ = Rugosidade da superfície mais rugosa

Os valores acima são derivados de um ajuste nos dados de [Ross e Stoute \(1962\)](#) mais aqueles de [Rapier et al. \(1963\)](#) usando o modelo de Mikic Todreas como em [Jacobs e Todreas \(1973\)](#).

4.4 Perfil Radial de Potência

O modelo do perfil radial de potência foi adicionado ao FRAPCON-3 [Berna et al. \(1997\)](#) e calcula o perfil de potência tanto em combustíveis UO_2 como em MOX sob regime LWR e HWR. Internamente, o modelo é implementado na função TUBRNP e é baseado no modelo proposto por Lassman como afirmado em [Geelhood et al. \(2011a\)](#).

Lassman em [Lassmann et al. \(1994\)](#) investigou a dependência da densidade de potência radial q''' com a queima que é basicamente determinada pela geometria da vareta de combustível, a concentração inicial de material físsil e o acúmulo de plutônio.

O modelo prevê o cálculo da distribuição da densidade de potência radial de uma pastilha de combustível em função da queima e o perfil radial de queima em função do tempo. O modelo é considerado como uma evolução do modelo RADAR descrito por Palmer e que foi usado no código TRANSURANUS.

A série FRAPCON [Geelhood et al. \(2014\)](#) não calcula o perfil radial de potência de combustíveis de urânio-gadolínia, para isso o código utiliza valores interpolados de uma tabela.

Os resultados apresentados pelo TUBRNP afetam os seguintes modelos segundo [Geelhood et al. \(2011a\)](#) e [Geelhood et al. \(2014\)](#):

- TURBIN, que calcula a concentração inicial de Urânio (235, 238) e Plutônio (239, 240 e 241, 242).
- TURBO, que calcula o fator radial utilizado no cálculo da potência e da queima.

4.5 Condutividade Térmica do Combustível

A condutividade térmica do combustível nuclear foi investigada por muito tempo e é uma importante propriedade do comportamento dos combustíveis nucleares sobre alta queima. A condutividade térmica pode influenciar a temperatura de operação da pastilha de UO_2 como sugere [Lucuta et al. \(1996\)](#) e [Owaki et al. \(2001\)](#), que apontam que a degradação da condutividade térmica é afetada pelo processo de queima do combustível devido ao dano provocado pela irradiação, pelos produtos de fissão sólidos e pela formação de bolhas de gás.

No FRAPCON-3 o modelo de análise térmica utilizado é baseado no modelo desenvolvido por Lucuta e inclui a expressão desenvolvida por Harding e Martin como apresentado em [Berna et al. \(1997\)](#). Este modelo foi substituído no FRAPCON-3.3. O modelo proposto pela Nuclear Fuel Industries (NFI), descrito por Ohira e Itagaki em 1997, foi incluído então no FRAPCON substituindo o modelo de Lucuta.

O modelo utilizado publicado por Ohira e Itagaki que é utilizado no FRAPCON como apresentado em [Lanning et al. \(2005\)](#) recebeu algumas modificações feitas pelo PNNL no que tange o ajuste do modelo para a densidade do combustível como-fabricado, em fração da densidade teórica usando a recomendação proposta por Lucuta para póros esféricos.

A modificação proposta pelo PNNL ao modelo original de Ohira e Itagaki que é utilizado no FRAPCON levantou algumas dúvidas que foram discutidas por [Unal et al. \(2013\)](#). Segundo os autores, a documentação do código não apresenta uma boa argumentação sobre a física envolvida na modificação do modelo.

O time do PNNL também mantém no FRAPCON um outro modelo de condutividade térmica para atender a uma exigência da US-NRC. O segundo modelo é o Halden MOX desenvolvido pelo *Halden Reactor Project* e foi introduzido no FRAPCON-3.2 como apresentado por [Lanning et al. \(2005\)](#). Também, é destacado que o time do PNNL não verificou o modelo Halden MOX, mas que o time do *Halden Reactor Project* tem mantido e verificado o modelo frente aos mais recentes dados "in-pile" sobre combustíveis MOX.

O modelo que calcula a condutividade térmica pertence à biblioteca de propriedades dos materiais e é chamado pela rotina FTHCON do código MATPRO [Hagman e Reymann \(1979\)](#).

4.6 Fluência do Revestimento

O método de solução da fluência utilizado no FRAPCON-3 segundo Geelhood *et al.* (2011a) é o modelo descrito por Limbäck e Anderson e utiliza o modelo térmico de fluência descrito por Matsuo e parâmetros ajustados por Franklin bem como modificações feitas pelo PNNL.

No FRAPCON-3.3, como fica demonstrado em Lanning *et al.* (2005), o modelo incorporou o ZIRLO™ e o M5™.

O modelo recebeu também modificações mais complexas no FRAPCON-3.4 onde os parâmetros utilizados para o Zircaloy-4 e Zircaloy-2 foram separados para *Stress Relief Annealed* (SRA), e *Re-crystallized Annealed* (RXA) e o código seleciona internamente estas correlações. Quando o material do revestimento é selecionado como M5™ o código seleciona a correlação RXA, e quando é selecionado o ZIRLO™ e o ZIRLO™ otimizado, o código seleciona a correlação SRA reduzida por um fator de 0,8 como apresentando em Geelhood *et al.* (2011a) e em Geelhood *et al.* (2014).

Adicionalmente às modificações descritas acima, o modelo de fluência foi modificado no FRAPCON-3.5 em relação ao FRAPCON-3.4. A expressão da taxa de deformação foi modificada, sendo que a taxa de deformação é calculada com base no tempo desde que a última deformação sofrida foi modificada em mais que 5MPa como explicado em Geelhood *et al.* (2014).

Este modelo é apenas uma pequena parte do modelo FRACAS-I, que calcula a deformação do combustível e do revestimento, como apresentado em Geelhood *et al.* (2011a) e Geelhood *et al.* (2014).

4.7 Deformação Radial do Combustível

O modelo de deformação radial devido à expansão térmica, inchamento por irradiação e densificação foi introduzido no FRAPCON-3 e pertence ao modelo FRACAS-I, onde influi diretamente no resultado final da deformação da pastilha combustível.

O modelo presente no FRAPCON-3 para o inchamento por irradiação, a cada passo iterativo, acumula uma taxa de 0,077% do volume por GWd/MTU como apresentando em Berna *et al.* (1997).

No FRAPCON-3.4, esta taxa de acúmulo foi mudada, sendo uma taxa de 0,062% do volume por MWd/kgU até 80 MWd/kgU e uma taxa de 0,086% do volume por MWd/kgU acima de 80 MWd/kgU, como descrito em Geelhood *et al.* (2011a).

O FRAPCON-3.5 manteve as taxas de acúmulo da versão 3.4 e recebeu um modelo para inchamento gasoso baseado no dados de Mogensén como apresentado em sua documentação Geelhood *et al.* (2014).

Os dados de Mogensén Mogensén *et al.* (1985) foram obtidos experimentalmente após a irradiação de um elemento combustível IFA 148 no reator de Halden, onde foi concluído que o gás liberado durante um transiente de potência é seguido por uma reestruturação do

combustível.

O time do PNNL que desenvolve o FRAPCON em concordância com [Lassmann et al. \(1998a\)](#), [Lucuta et al. \(1996\)](#) e [Mogensen et al. \(1985\)](#) acredita que os resultados das pesquisas feitas sugerem que o inchamento gasoso afeta a pastilha de UO_2 e pode influenciar permanentemente a tensão de escoamento do revestimento em queimas extendidas das varetas de combustível, como também afirma a documentação do FRAPCON em [Geelhood et al. \(2014\)](#).

O modelo para a deformação radial adicionado à versão 3.5 do código, apresenta duas expressões que governam o modelo, que funcionam entre 40 e 50 MWd/kgU [Geelhood et al. \(2014\)](#):

$$\frac{\Delta l}{l} = 4,55 \times 10^{-5} T - 4,37 \times 10^{-2} \quad \text{para} \quad 960C < T < 1370C \quad (4.21)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 4,05 \times 10^{-5} T - 7,40 \times 10^{-2} \quad \text{para} \quad 1370C < T < 1832C \quad (4.22)$$

4.8 Realocação do Combustível

Desde o FRAPCON-3 é usado o modelo GT2R2 para calcular a relocação do combustível. Este modelo foi desenvolvido por Cunningham e Beyer e é similar ao modelo proposto por Oguma só que menos complexo, como é apresentado por [Geelhood et al. \(2014\)](#).

A equipe de desenvolvimento do FRAPCON promoveu algumas modificações para que este modelo pudesse ser usado juntamente com o modelo FRACAS-I para estimar a deformação da pastilha combustível.

No FRAPCON-3.2 [Berna et al. \(1997\)](#), o modelo recebeu algumas modificações simples em suas constantes como apresentado abaixo.

O FRAPCON.3-5 recebeu modificações mais profundas em seu modelo de relocação do combustível, pois devido a verificações feitas no modelo presente na versão 3.4, foi observado que o modelo apresentava alguns valores subestimados da temperatura central da pastilha combustível durante rampas de potência, embora apresentasse ótimos resultados para longas operações e estado-estacionário.

Sendo assim, o modelo presente no FRAPCON-3.4 foi utilizado apenas para ser utilizado quando a taxa de queima do combustível estiver além dos 5GWd/MTU como apresentado em [Geelhood et al. \(2014\)](#).

No FRAPCON-3.0 [Lanning et al. \(1997\)](#) tem-se o seguinte modelo:

$$\frac{\Delta G}{G} = 30 + 5FBU \quad \text{para} \quad LHGR < 20 \frac{kW}{m} \quad (4.23)$$

$$\frac{\Delta G}{G} = 30 + PFACTOR + (5 + PFACTOR)FBU \quad \text{para} \quad LHGR < 40 \frac{kW}{m} \quad (4.24)$$

$$\frac{\Delta G}{G} = 35 + 10FBU \quad \text{para} \quad LHGR > 40 \frac{kW}{m} \quad (4.25)$$

No FRAPCON-3.2 [Berna et al. \(1997\)](#) as constantes foram modificadas ficando o modelo da seguinte forma:

$$\frac{\Delta G}{G} = 30 + 10FBU \quad \text{para} \quad LHGR < 20 \frac{kW}{m} \quad (4.26)$$

$$\frac{\Delta G}{G} = 28 + PFACTOR + (12 + PFACTOR)FBU \quad \text{para} \quad LHGR < 40 \frac{kW}{m} \quad (4.27)$$

$$\frac{\Delta G}{G} = 32 + 18FBU \quad \text{para} \quad LHGR > 40 \frac{kW}{m} \quad (4.28)$$

Onde para ambos os casos acima segundo [Lanning et al. \(1997\)](#) e [Berna et al. \(1997\)](#) temos:

$$FBU = \frac{BURNUP}{5} \quad \text{para} \quad BURNUP < 5 \frac{GWd}{MTU} \quad (4.29)$$

$$FBU = 1.0 \quad \text{para} \quad BURNUP > 5 \frac{GWd}{MTU} \quad (4.30)$$

No FRAPCON-3.5 [Geelhood et al. \(2014\)](#), o modelo foi modificado para a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta G}{G} = 0,055 \quad \text{para} \quad BURNUP < 0,0937 \frac{GWd}{MTU} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta G}{G} &= 0,055 + \min(\text{reloc}, \text{reloc}(0,5795 + 0,2447 \ln(BURNUP))) \\ &\quad \text{para} \quad BURNUP > 0,0937 \frac{GWd}{MTU} \end{aligned} \quad (4.32)$$

Onde:

$$\text{reloc} = \begin{cases} 0,0345 & \text{para} \quad P < 20 \\ 0,345 + \frac{P-20}{200} & \text{para} \quad 20 \leq P \leq 40 \\ 0,445 & P > 40 \end{cases} \quad (4.33)$$

4.9 Modelo Modificado Forsberg-Massih

O modelo modificado de Forsberg-Massih utilizado na série FRAPCON se mantém praticamente inalterado, a não ser por pequenas modificações em suas constantes.

Os valores para a concentração de gás calculados pelo modelo modificado de Forsberg-Massih, quando este é selecionado pelo usuário, estimam a pressão interna do gás na vareta

combustível segundo Geelhood *et al.* (2011a) pela seguinte equação:

$$P = \frac{MR}{\frac{V_p}{T_p} + \sum_{n=1}^N \left[\frac{V_g}{T_g} + \frac{V_{ch}}{T_{ch}} + \frac{V_{cr}}{T_{cr}} + \frac{V_{dsh}}{T_{dsh}} + \frac{V_{por}}{T_{por}} + \frac{V_{rf}}{T_{rf}} + \frac{V_i}{T_i} \right]} \quad (4.34)$$

Onde o volume V é dado em (m^3) a e temperatura em (K), e:

P	= Pressão interna da vareta (Pa)
R	= Constante universal dos gases, 8,34 J/mol-K
M	= Total de mols de gás
N	= Nós axiais nos quais a vareta combustível foi dividida durante a solução numérica
n	= Número do nó axial
V_p, T_p	= Temperatura e volume do plenum
V_g, T_g	= Temperatura e volume da folga pastilha-revestimento
V_{ch}, T_{ch}	= Temperatura e volume do vazio central
V_{cr}, T_{cr}	= Temperatura e volume das trincas
V_{dsh}, T_{dsh}	= Temperatura e volume da concavidade
V_{por}, T_{por}	= Temperatura e volume da porosidade aberta
V_{rf}, T_{rf}	= Temperatura e volume da rugosidade
V_i, T_i	= Temperatura e volume da interface combustível-revestimento

A variável M recebe o valor total do inventário de gases produzido por cada iteração, incluindo a concentração de gases de fissão, que podem vir do modelo modificado de Forsberg-Massih ou ANS-5.4, dependendo da escolha do usuário, juntamente com o Hélio e o Nitrogênio liberado.

A modificação feita dentro do modelo modificado de Forsberg-Massih foi a constante FITMULT, que é um parâmetro empírico do modelo, que governa o acúmulo de grãos e sua resolução, como apresentado por Geelhood *et al.* (2014). A alteração efetuada modificou seu valor, que era 250 desde o FRAPCON-3, para 300 no FRAPCON-3.3, como apresentado em Lanning *et al.* (2005).

No FRAPCON-3.3, o fator de aumento da queima também foi modificado. Na versão 3.0 tem-se um multiplicador de 14 vezes que era aplicado sobre a constante da difusão e do aumento da queima em sua última iteração de cálculo. O fator de aumento de queima, como apresentado em Berna *et al.* (1997), tem a seguinte expressão:

$$100^{\frac{BURNUP-21}{35}} \quad (4.35)$$

No FRAPCON-3.3 como apresentado por Lanning *et al.* (2005), o fator multiplicador passou de 14 para 12 e a expressão do fator de queima ficou:

$$100^{\frac{BURNUP-21}{40}} \quad (4.36)$$

Já no FRAPCON-3.5 Geelhood *et al.* (2014), a única modificação efetuada foi na cons-

tante de difusão do modelo de Forsberg-Massih para temperaturas acima de 1850K, sendo que a partir desta temperatura a constante de difusão será sempre calculada para uma temperatura fixa de 1850K.

4.10 Modelo FRAPFGR

Este modelo foi adicionado no FRAPCON-3.4 [Geelhood et al. \(2011a\)](#) para inicializar o modo de transiente utilizado pelo código FRAPTRAN e foi recentemente desenvolvido pelo PNNL.

4.11 Volume de Vazio da Vareta Combustível

O modelo para o cálculo do volume de vazio da vareta combustível se manteve o mesmo desde o FRAPCON-3, sendo que no FRAPCON-3.5 [Geelhood et al. \(2014\)](#) foi adicionado o volume do chanfro na pastilha de combustível na porção do volume entre as pastilhas.

Esta modificação afeta o resultado da pressão interna da vareta combustível, pois o volume da concavidade é levado em conta, como apresentado na equação [4.34](#).

4.12 Modelos de Corrosão para PWR e BWR

Desde o FRAPCON-3, o modelo para corrosão do revestimento da vareta vem sendo atualizado. As modificações vem sendo feitas nos modelos e nas constantes das correlação, com a adição de novos materiais de revestimentos tais como o M5TM, ZIRLOTM e o ZIRLOTM otimizado.

O FRAPCON-3.0 [Lanning et al. \(1997\)](#) tinha apenas o modelo de corrosão do revestimento da vareta combustível para os materiais Zircaloy-2 e Zircaloy-4.

No FRAPCON-3.3, foi adicionado o modelo para o M5TM e o ZIRLOTM, mas conforme [Lanning et al. \(2005\)](#) nenhuma modificação profunda foi efetuada para que os novos materiais pudessem ser adicionados. De fato o que ocorreu foi que quando era selecionado como material de revestimento o M5TM ou o ZIRLOTM, o código calculava os resultados utilizando o modelo do Zircaloy-4 e ao final reduzia o resultado da corrosão e de captura de hidrogênio de um fator redutor.

Para o ZIRLOTM, o fator de redução era de 2,0 sobre o resultado final obtido pelo modelo de corrosão do Zircaloy-4. Segundo [Lanning et al. \(2005\)](#), os resultados obtidos ficavam próximos aos dados de corrosão apresentados por Knott.

Já para o M5TM, o fator de redução para a corrosão sobre o valor obtido pelo modelo do Zircaloy-4 era de 2,3 e segundo [Lanning et al. \(2005\)](#) os resultados obtidos ficavam próximos aos valores apresentados por Mardon e Waackel e também no website da FRAMATOME.

No FRAPCON-3.3 para o Zircaloy-4 sob o regime de PWR, a equação da formação de óxido é obtida integrando-se a equação sem considerar a espessura da camada de óxido e a temperatura entre a interface metal-óxido, que é a equação de Garzarolli como apresentado

em Geelhood *et al.* (2011a). No FRAPCON-3.4, a equação da formação de óxido é obtida pela regra da dependência da taxa de fluxo linear, pois há uma significativa relação entre a espessura da camada de óxido e a temperatura da interface metal-óxido, sendo que a espessura de óxido é convertida em ganho de peso e a aproximação pela integral de Garzarolli é utilizada como descrito em Geelhood *et al.* (2011a) e apresentada a seguir:

$$\Delta w_{i+1} = \Delta w_i + \frac{RT_o^2 \lambda}{\gamma Q_2 q''} \ln \left[1 - \frac{\gamma Q_2 q''}{RT_o^2 \lambda} k_o \cdot \exp \left(\frac{-Q_2}{RT_o} \right) \exp \left(\frac{\gamma Q_2 q'' \Delta w_i}{RT_o^2 \lambda} \right) (t_{i+1} - t_i) \right]^{-1} \quad (4.37)$$

Onde:

- i, i+1 = Refere-se ao passo de tempo
- s = Espessura de óxido(m)
- Δw = Ganho em peso ($\frac{g}{cm^2}$)
- R = 1,98 ($\frac{cal}{mol-K}$)
- T_o = Temperatura da interface óxido-água (K)
- λ = Condutividade térmica do óxido ($\frac{W}{cm-K}$)
- γ = 0,6789 ($\frac{cm^3}{g}$)
- Q_2 = Constante que depende do material escolhido
- q'' = Fluxo de calor ($\frac{W}{cm^2}$)
- k_o = $11863 + 3,5 \times 10^4 (1,91 \times 10^{-15} \Phi)^{0,24} (\frac{g}{cm^2-dia})$
- Φ = Fluxo de nêutrons (E>1 MeV) ($\frac{n}{cm^2/s}$)
- t = Tempo (dias)

A equação para a determinação da espessura de óxido a cada iteração é a seguinte:

$$s_{i+1} = \left(3A \exp \left[\frac{-Q_1}{RT_1} \right] (t_{i+1} - t_1) + s_i^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.38)$$

Onde:

- i, i+1 = Refere-se ao passo de tempo
- s = Espessura de óxido(m)
- A = $6,3 \times 10^9 (\frac{m^3}{dia})$
- Q_1 = Depende do material escolhido
- R = 1,98 ($\frac{cal}{mol-K}$)
- T_1 = Temperatura da interface óxido metal (K)
- t = Tempo (dias)

Com estas modificações, o modelo de corrosão do FRAPCON-3.4 ficou mais complexo, sendo então inseridas novas constantes Q_1 e Q_2 que governam o funcionamento do modelo para os materiais de revestimento M5TM e ZIRLOTM. Então, para o M5TM na versão 3.4

segundo Geelhood *et al.* (2011a) temos os seguintes valores para as constantes:

$$Q_1 = 27466 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \quad e \quad Q_2 = 29816 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \quad (4.39)$$

Para ZIRLO™ na versão 3.4 temos:

$$Q_1 = 27466 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \quad e \quad Q_2 = 27080 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \quad (4.40)$$

No FRAPCON-3.5 foi adicionado o material de revestimento ZIRLO™ otimizado. Foram efetuadas também modificações nas constantes Q_1 e Q_2 , que funcionam para o ZIRLO™ bem como para o ZIRLO™ otimizado, como apresentado em Geelhood *et al.* (2014), sendo assim temos:

$$Q_1 = 27080 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \quad e \quad Q_2 = 27354 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \quad (4.41)$$

Para o material de revestimento M5™ nenhuma modificação foi efetuada no FRAPCON-3.5.

4.13 Captura de Hidrogênio

O modelo para captura de hidrogênio utilizado pelo FRAPCON-3 calcula a fração de hidrogênio que é absorvido pelo revestimento, devido ao efeito da corrosão causada pela água na parte externa do revestimento.

Na versão FRAPCON-3.3, a fração de captura de hidrogênio pelo revestimento de Zircaloy-2 é um fator de 29%, para Zircaloy-4 a fração é de 15% que também era o valor utilizado no FRAPCON-3.0 como apresentado em Lanning *et al.* (2005).

Para o ZIRLO™, o FRAPCON-3.3 tem como taxa de captura de hidrogênio uma fração de 12,5% baseado em testes de irradiação apresentados por Tsukuda Lanning *et al.* (2005). Já para o M5™, o FRAPCON-3.3 tem como fração de captura de hidrogênio o percentual de 7,5% baseado em dados apresentados pela FRAMATOME Lanning *et al.* (2005).

No FRAPCON-3.4, a fração de captura de hidrogênio pelo Zircaloy-4 é de 15,0%, a fração de captura de hidrogênio para o M5™ é de 10,0%, sendo que para o ZIRLO™ a fração de 12,5% foi mantida. Já o modelo para cálculo da captura de hidrogênio para o Zircaloy-2 foi totalmente modificado.

O modelo para o Zircaloy-2 passou a ser dividido em dois modelos como temos em Geelhood *et al.* (2011a). O primeiro modelo é aplicado para revestimentos de Zircaloy-2 fabricados antes de 1998, quando não se tinha um controle apurado sobre a concentração e sobre o tamanho das partículas precipitadas. Para este caso, a expressão utilizada é a seguinte:

$$H_{conc} = 47,8 \exp \left(\frac{-1,3}{1 + BU} \right) + 0,316 BU \quad se \quad BU < 50 \frac{GWd}{MTU} \quad (4.42)$$

$$H_{conc} = 28,9 + \exp(0,177(BU - 20)) \quad \text{se } BU > 50 \frac{GWd}{MTU} \quad (4.43)$$

Já o segundo modelo para revestimentos de Zircaloy-2 é aplicado para revestimentos fabricados após 1998, quando já se tem um controle apurado sobre a concentração e o tamanho das partículas precipitadas. Para este caso a expressão é a seguinte:

$$H_{conc} = 22,8 + \exp(0,177(BU - 20)) \quad (4.44)$$

Onde:

H_{conc} = concentração de hidrogênio (ppm)

BU = queima local ($\frac{GWd}{MTU}$)

No FRAPCON-3.5, como citado em [Geelhood *et al.* \(2014\)](#), a fração de concentração para ZIRLO™ foi modificada passando dos 12,5% do FRAPCON-3.4 para 17,5%, sendo que este novo valor é compartilhado também com o ZIRLO™ otimizado.

Capítulo 5

Simulações com o Programa FRAPCON

Neste capítulo serão apresentadas as simulações realizadas e seus resultados. O objetivo destas simulações é comparar os cálculos fornecidos pelas três versões do FRAPCON analisadas, buscando entender o reflexo que cada modificação feita em cada versão do código trouxe para os resultados finais obtidos. As versões analisadas foram: FRAPCON-3.3, FRAPCON-3.4 e FRAPCON-3.5.

As análises feitas utilizaram uma vareta combustível 16x16 de um reator PWR padrão com pastilhas de UO_2 em regime de alta queima até $60 \frac{MWd}{kgU}$.

5.1 Simulação Computacional

A simulação computacional feita com o código objetivou comparar os resultados apresentados por cada uma das três versões do FRAPCON nos seguintes itens:

- Formação de óxido na parte externa do revestimento;
- Temperatura central do combustível;
- Liberação de gases de fissão e pressão interna na vareta;
- Tamanho da folga entre a pastilha e o revestimento;
- Temperatura média do revestimento;
- Deformações e tensões no revestimento.

A escolha dos itens que foram analisados levou em conta a sua relação com as modificações feitas no código. Algumas das alterações feitas no código refletem diretamente nos resultados obtidos, enquanto outras modificações afetavam indiretamente os resultados simulados. Assim sendo, os itens escolhidos visaram a cobrir o efeito destas mudanças da melhor maneira possível.

Para as simulações foram gerados três arquivos de entrada. Cada arquivo de entrada tinha um material de revestimento distinto em sua configuração, sendo eles o Zircaloy-4, ZIRLO™ e M5™.

Vale ressaltar também, que embora o FRAPCON tenha recebido alguns novos comandos de entrada, ao ser escrito os dados de entrada da simulação, procurou-se utilizar apenas os comandos de entrada disponíveis de maneira comum entre as versões analisadas.

A queima do combustível foi realizada até $60 \frac{MWd}{kgU}$ e o histórico de potência foi entorno de $20 \frac{kW}{m}$ por dia, sendo que os arquivos de entrada utilizados estão no apêndice A.

As simulações feitas geraram nove arquivos agrupados em um conjunto de três saídas para cada versão analisada. Os arquivos de saída gerados são extensos, pois para cada passo de tempo são listadas todas as variáveis calculadas.

Para entender o comportamento do combustível e os resultados apresentados por cada versão do código, foram feitos gráficos comparativos com os resultados das simulações.

Os resumos dos arquivos de saída gerados pelo FRAPCON estão listados no apêndice B e contêm todos os dados necessários para fazer os gráficos e analisar o comportamento de cada vareta, segundo cada simulação feita.

5.2 Dados da Vareta Combustível Utilizada

A vareta combustível utilizada nas simulações foi a de um reator PWR 16x16, abastecidas com pastilhas de UO_2 , preenchida com helio e cujas especificações técnicas estão detalhadas na Tabela 5.2. A tabela 5.1 apresenta os parâmetros termo hidráulicos da vareta combustível.

Tabela 5.1: *Parametros Termo Hidráulicos do Reator.*

Potência Térmica Total	2850 MW_t
Pressão do refrigerante	15,51Mpa
Temperatura de entrada do refrigerante	287,7 °C
Potência linear média da vareta	20,17 kW/m
Fluxo da massa de refrigerante	5900 kg/s.m ²
Velocidade média do refrierante	4,98 m/s

Tabela 5.2: *Descrição da Vareta Combustível Simulada.*

Altura da pastilha	9,8298 mm
Chanfro e dish	0,064 mm
Altura da coluna de pastilhas	304,8 mm
Enriquecimento (% U^{235})	4,5
Diâmetro externo do revestimento	9,4996 mm
Espessura do revestimento	0,5715 mm
Pressão do gás de enchimento	2,34 MPa
Gás de enchimento	He
Queima média da vareta	60 MWd/kgU
Densidade	95,5 %Dt
Comprimento do plenum	161,00 mm
Número de nós axiais	9
Gap diametral	0,0825 mm

O histórico de potência utilizado e a queima em função do tempo é apresentado na figura 5.1.

Figura 5.1: Histórico de potência utilizado, Potência linear da vareta (kW/m) e Queima (MWd/kgU) em função do tempo de irradiação (dias). Fonte: Autor.

5.3 Comparação dos Resultados da Formação de Óxido de Zircônio

A oxidação do revestimento do combustível pelo lado externo é causada pela reação do zircônio com a água. O modelo para corrosão no FRAPCON foi modificado de forma mais relevante entre as versões 3.3 e 3.4 e de forma mais simples entre a versão 3.4 e 3.5, como apresentado no capítulo 4.

Essa modificação nos modelos levou a uma diferença na formação do óxido de zircônio durante a queima do combustível, de forma que se pode observar uma diferença no comportamento da curva de formação de óxido mais significativa principalmente entre as versões 3.3 e 3.4, assim, observando as mudanças mais profundas entre estas versões.

As mudanças feitas no modelos de oxidação do revestimento levaram à formação de uma camada de óxido maior para os revestimentos de Zircaloy-4 e de ZIRLOTM e menor para o revestimento de M5TM em comparação entre as versões 3.3 e 3.4. O comportamento da corrosão do revestimento da versão 3.4 e da versão 3.5 manteve-se muito próximo.

Mesmo com estes resultados, a espessura da camada de óxido formada foi menor que o

limite máximo de $70\mu m$.

Pode-se observar nos gráficos as Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 os resultados obtidos para a espessura da camada de óxido formada em razão da queima para os revestimentos de M5™, Zircaloy-4 e ZIRLO™ entre as versões do FRAPCON-3-3, 3-4, 3-5.

Figura 5.3: Espessura da camada de óxido formada em função da queima do combustível para o revestimento de Zircaloy-4 para o 3º nó axial (nó do pico de potência). Fonte: Autor.

Figura 5.4: Espessura da camada de óxido formada em função da queima do combustível para o revestimento de ZIRLO™ para o 3º nó axial (nó do pico de potência). Fonte: Autor.

5.4 Comparação dos Resultados da Temperatura Central do Combustível

A temperatura central do combustível é um resultado dos modelos, que representam o comportamento térmico da vareta, sendo que os modelos que foram modificados são: condição do refrigerante; temperatura da vareta combustível; condução através da interface de gás; condutividade através dos pontos de contato; perfil radial da potência e condutividade térmica.

Apesar das modificações feitas neste conjunto de modelos, foi observado que a temperatura central do combustível se manteve muito próxima em todas as versões do FRAPCON, sendo que a versão 3.3 apresentou uma temperatura levemente menor no intervalo de queima compreendido entre $\approx 4,5 \frac{MWd}{kgU}$ e $\approx 15 \frac{MWd}{kgU}$.

Esta temperatura menor, neste intervalo inicial, pode ser associada ao fechamento da folga entre a pastilha e o revestimento que no FRAPCON-3.3 se dá de forma mais rápida neste intervalo, como fica evidente no Figura 5.8.

A Figura 5.5 apresenta o gráfico comparativo entre as três versões do FRAPCON e o comportamento da temperatura central do combustível. Pode-se observar que mesmo com a pequena variação inicial já mencionada, a temperatura central se manteve distante do máximo de 2500 °C que compreende a temperatura de fusão do UO_2 .

Figura 5.5: Temperatura central do combustível, utilizando o revestimento de M5™. Fonte: Autor.

5.5 Comparação dos Resultados da Liberação dos Gases de Fissão e Pressão Interna da Vareta

A pressão interna da vareta combustível é modificada pela liberação dos gases de fissão durante a queima do combustível. O modelo de liberação de gases utilizado pelo FRAPCON recebeu pequenas mudanças entre as versões 3.3, 3.4 e 3.5, o que refletiu em mudanças nos resultados apresentados nas simulações, entre as três versões analisadas.

O gráfico apresentado na Figura 5.6 representa os resultados dos gases de fissão liberados nas simulações das três versões do FRAPCON. O gráfico da Figura 5.7 mostra a pressão interna na vareta combustível das simulações para as três versões do FRAPCON analisadas. Os resultados obtidos não apresentam diferenças significativas nas simulações realizadas para as três versões do FRAPCON.

Figura 5.6: Gases de fissão liberados em função da queima do combustível utilizando o revestimento de $M5^{\text{TM}}$. Fonte: Autor.

Figura 5.7: Pressão interna da vareta combustível em função da queima do combustível utilizando o revestimento de *M5™*. Fonte: Autor.

5.6 Comparação dos Resultados do Tamanho da Folga Pastilha-Revestimento

O comportamento do tamanho da folga entre a pastilha e o revestimento com o decorrer da queima é o resultado indireto dos modelos de relocação do combustível e da deformação radial. Estes modelos foram modificados entre as versões 3.3 e 3.4 do FRAPCON. Com efeito pode-se observar um fechamento mais lento da folga entre a pastilha e o revestimento nas versões 3.4 e 3.5 do código.

Pode-se observar também que a folga da pastilha ao longo da queima nunca atinge zero. Isso ocorre devido à rugosidade do material da pastilha combustível que é considerado no cálculo.

Figura 5.8: Tamanho da folga em função da queima no revestimento M5™. Fonte: Autor.

5.7 Comparação dos Resultados da Temperatura Média do Revestimento

A temperatura média do revestimento do combustível é um resultado indireto que depende do tamanho da folga entre a pastilha e o revestimento e da temperatura do combustível.

Como estes modelos foram modificados a partir da versão 3.4 e 3.5 frente à versão 3.3, foram observados algumas diferenças na temperatura do revestimento.

Pode-se observar, que na versão 3.3, no mesmo intervalo, o fechamento da folga entre a pastilha e o revestimento é maior e a temperatura central do combustível é menor, em comparação com as versões 3.4 e 3.5. Também, é o período que apresenta uma menor temperatura do revestimento, que indica que neste intervalo, devido ao contato, ocorre uma melhor transferência de calor.

A Figura 5.9 mostra o comparativo entre as três versões do FRAPCON com respeito ao comportamento da temperatura do revestimento do combustível em função da queima. Pode-se observar o valor ligeiramente menor da temperatura do revestimento no intervalo entre $\approx 4,5 \frac{MWd}{kgU}$ até $\approx 15 \frac{MWd}{kgU}$, apresentado pelo FRAPCON-3.3.

Figura 5.9: Temperatura do revestimento $M5^{\text{TM}}$ em função da queima. Fonte: Autor.

5.8 Comparação dos Resultados das Deformações e Tensões do Revestimento

A deformação e tensões no revestimento são resultados indiretos da pressão interna e do contato entre a pastilha combustível e o revestimento.

Como estes modelos foram modificados entre as versões 3.3, 3.4 e 3.5 do FRAPCON, uma diferença entre os resultados das deformações e tensões obtidas pelas diferentes versões pode ser notada nas figuras 5.10 e 5.11. A versão 3.3 apresenta os maiores valores para as deformações e tensões circunferenciais no revestimento.

Embora ocorra uma variação no percentual de deformação durante a queima do combustível, a deformação equivalente máxima não ultrapassou o limite de 1%.

Figura 5.10: Deformação percentual do revestimento $M5^{\text{TM}}$ em função da queima. Fonte: Autor.

Figura 5.11: Tensão circunferencial no revestimento $M5^{\text{TM}}$ em função da queima. Fonte: Autor.

Capítulo 6

Discussão dos Resultados e Conclusão

As modificações introduzidas ao longo das sucessivas versões nos modelos de cálculo do programa FRAPCON foram verificadas neste trabalho. Três versões do programa foram analisadas: FRAPCON-3.3, FRAPCON-3.4 E FRAPCON-3.5. As principais modificações encontram-se nos modelos de transferência de calor entre o combustível, o revestimento e o fluido refrigerante, nos modelos mecânicos de deformação da pastilha combustível, no modelo de liberação de gases na vareta combustível e nos modelos de corrosão e captura de hidrogênio no revestimento.

Uma vareta combustível, típica de um reator PWR, foi utilizada para comparar os resultados da simulação com as diferentes versões do código FRAPCON. O mesmo histórico de potência foi utilizado em todas as simulações. Os resultados da simulações mostram que os modelos de deformação do combustível na versão FRAPCON-3.3 levam a um mais rápido fechamento da folga pastilha-revestimento na vareta combustível quando comparados com os resultados das versões FRAPCON-3.4 e FRAPCON-3.5 para essa variável. Nessas duas últimas versões, não se notam diferenças significativas nos tamanhos da folga pastilha-revestimento obtidos ao longo da irradiação. Em consequência do fechamento mais rápido da folga pastilha-revestimento na versão FRAPCON-3.3, menores temperaturas no combustível e no revestimento da vareta combustível são encontradas no início da irradiação. A partir do fechamento da folga, devido a melhoria na condução do calor, as temperaturas calculadas se aproximam nas três versões do programa analisadas.

Os resultados das simulações para o comportamento mecânico do revestimento mostram que maiores deformações são obtidas no versão FRAPCON-3.3 tanto para a vareta com a folga aberta como fechada ao longo da irradiação. Em queimas elevadas, as deformações na versão FRAPCON-3.5 igualam as deformações obtidas na versão FRAPCON-3.3. As deformações calculadas na versão FRAPCON-3.4 são sempre inferiores as calculadas nas outras versões tanto em regime de folga aberta ou fechada. Já, os resultados para as tensões circunferenciais (hoop stress) no revestimento apresentam valores mais elevados na versão FRAPCON-3.3 e são praticamente iguais tanto com folga aberta ou fechada nas versões FRAPCON-3.4 e FRAPCON-3.5.

Resultados comparativos significativos foram obtidos para a espessura da camada de óxido no revestimento. No caso do revestimento de M5TM, a camada de óxido formada nas

versões FRAPCON-3.4 e FRAPCON 3.5 são mais espessas até queimas da ordem de 40 MWd/kgU que as calculadas na versão FRAPCON-3.3 e a partir dessa queima, elas se tornam menos espessas que as calculadas nessa última versão. No caso do revestimento de Zircaloy-4, não se notam diferenças entre os valores obtidos para a espessura da camada de óxido do revestimento nas versões FRAPCON-3.3, 3.4 e 3.5, evidenciando que o modelo para esse parâmetro é idêntico nas três versões do programa FRAPCON. Já para o revestimento de Zirlo, as versões 3.4 e 3.5 do FRAPCON apresentam espessuras da camada de óxido praticamente iguais e menores que as calculadas na versão do FRAPCON-3.3 durante toda a irradiação. Analisando os resultado para o parâmetro espessura da camada de óxido, nota-se que menores espessuras são obtidas para o revestimento de M5™ ($\approx 20 \mu\text{m}$) seguida pelo Zirlo ($\approx 30 \mu\text{m}$) e finalmente pelo Zircaloy-4 ($\approx 60 \mu\text{m}$) ao final da irradiação e coerente com as modificações introduzidas para esse parâmetro nas versões sucessivas do programa FRAPCON.

Finalmente, pode-se concluir que a versão FRAPCON-3.5, caso validada, apresentou resultados para os diversos parâmetros da vareta menos conservativos e mais distantes dos limites de projetos estipulados para as temperaturas no combustível, tensões e deformações no revestimento e pressão interna na vareta do que as versões anteriores do programa. A utilização dessa versão é recomendada.

6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, seria interessante comparar os resultados obtidos da simulação dessa vareta típica de PWR com o FRAPCON 3.5 com resultados de outros programas computacionais de análise de desempenho do combustível nuclear, como por exemplo o TRANSURANUS, para verificar a pertinência dos modelos utilizados a queimas elevadas e se possível fazer comparações com dados experimentais, como os fornecidos nos programas de análise de desempenho do combustível nuclear em regimes permanente e transiente da Agência Internacional de Energia Atômica - *AIEA (International Atomic Energy Agency - IAEA)*.

Apêndice A

Arquivo de Entrada do Programa FRAPCON-3

O arquivo de entrada utilizado nas simulações foi praticamente o mesmo, recebendo em cada simulação, apenas uma alteração na variável "ICM", que especifica o material de revestimento utilizado, onde:

ICM = 4 = Zircaloy-4.

ICM = 5 = M5™.

ICM = 6 = ZIRLO™.

```
1 *****
2 *          FRAPCON-3, steady-state fuel rod analysis code          *
3 *-----*
4 *
5 *          CASE DESCRIPTION:PWR Generic          *
6 *
7 *UNIT      FILE DESCRIPTION
8 *-----*-----Output :
9 *          Output :
10 *      6          STANDARD PRINTER OUTPUT
11 *
12 *          Scratch :
13 *      5          SCRATCH INPUT FILE FROM ECH01
14 *
15 * Input:   FRAPCON-3 INPUT FILE (UNIT 55)
16 *
17 *****
18 * GOESINS:
19 FILE05='nullfile ', STATUS='UNKNOWN', FORM='FORMATTED',
20     CARRIAGE CONTROL='NONE'
21 *
22 * GOESOUTS:
23 FILE06='PWR_Z4.out ',
24     STATUS='UNKNOWN', CARRIAGE CONTROL='LIST'
25 FILE66='PWR_Z4.plot ',
26     STATUS='UNKNOWN', FORM='FORMATTED',CARRIAGE CONTROL='LIST'
27 /*****
28 PWR Generic Fuel Rod
29 $frpcn
30 im=37, nr=17, ngasr=39, na=9
```

```

31 $end
32 $frpcon
33 dco=0.374, thkcld=0.0225, thkgap=0.00325, totl=12, cpl=6.3386
34 dspg=0.3189, dspgw=0.0394, vs=30
35 hplt=0.387, rc=0, hdish=0.0094, dishsd=0.064
36 enrch=4.5, imox=0, comp=0
37 fotmtl=2, gadoln=0, ppmh2o=0, ppmn2=0
38 den=95.5, deng=0, roughf=0.0000787, rsnt=100, tsint=2911
39 icm=4, cldwks=0.5, roughc=0.0000197, catexf=0.05, chorg=10
40 fg pav=340.84, idxgas=1
41
42
43 iplant=-2, pitch=0.4291, icor=0, crdt=0, crdtr=0, flux=10*2210000000000000
44 crephr=10, sgapf=31, slim=0.05, qend=0.3
45 jdlpr=1, nopt=0, nplot=1, ntape=0, nread=0, nrestr=0
46 ProblemTime=
47 50, 100, 150, 200, 250
48 300, 350, 351, 400, 450
49 500, 550, 600, 650, 672
50 700, 750, 800, 850, 900
51 950, 1000, 1050, 1065, 1100
52 1150, 1200, 1250, 1300, 1350
53 1400, 1450, 1500, 1550, 1587
54 1600, 1650
55
56 qmpy=
57 5.608, 5.608, 5.608, 5.608, 5.608
58 5.608, 5.608, 5.608, 6.184, 6.184
59 6.184, 6.184, 6.184, 6.184, 6.184
60 6.148, 6.148, 6.148, 6.148, 6.148
61 6.148, 6.148, 6.148, 6.148, 6.148
62 6.148, 6.148, 6.148, 6.148, 6.148
63 6.148, 6.148, 6.148, 6.148, 6.148
64 6.148, 6.148
65 nsp=0
66 p2= 2250, tw= 550, go= 2550000
67 iq=0, fa=1
68 x(1)=
69 0, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8
70 6, 7.2, 8.4, 9.6, 10.8
71 12
72 qf(1)=
73 2, 6, 7, 7.1, 7
74 6.8, 6.6, 6.65, 6.5, 5.4
75 2.5
76 x(12)=
77 0, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8
78 6, 7.2, 8.4, 9.6, 10.8
79 12
80 qf(12)=
81 2, 5.2, 6, 6.2, 6.05
82 6, 5.8, 5.8, 5.7, 4.7
83 2.2
84 x(22)=
85 0, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8
86 6, 7.2, 8.4, 9.6, 10.8
87 12
88 qf(22)=
89 2.2, 6, 7, 7, 7
90 6.8, 6.7, 6.7, 6.5, 5.5

```

```

91      2.8
92  x(33)=
93  0, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8
94  6, 7.2, 8.4, 9.6, 10.8
95      12
96  qf(33)=
97  0.5, 1.8, 2.2, 2.3, 2.2
98  2.2, 2.2, 2.2, 2.2, 1.9
99      0.8
100 x(45)=
101 0, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8
102 6, 7.2, 8.4, 9.6, 10.8
103      12
104 qf(45)=
105 2.3, 6.2, 7, 7.1, 6.9
106 6.7, 6.6, 6.5, 6.4, 5.2
107      3
108 jn=11,11,11,11,11
109 jst=
110 1, 1, 1, 1, 1
111 1, 1, 1, 2, 2
112 2, 2, 2, 2, 2
113 3, 3, 3, 3, 3
114 3, 3, 3, 3, 4
115 4, 4, 4, 4, 4
116 4, 4, 4, 4, 4
117 5, 5, 5, 5, 5
118 5, 5, 5, 5, 5
119      5
120 $end

```

Apêndice B

Arquivos de Saída do Programa FRAPCON-3

Quadro dos dados de saída produzido pelo FRAPCON-3.3, com todos os passos de tempo para o revestimento de Zircaloy-4.

```
1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
2 x                                     **** FRAPCON-3.3 (Aug. 12 05) ****                      x
3 x                                     Released August    2005                      x
4 x PWR Generic Fuel Rod                                                         x
5 x                                     run date: 16-Mar-30                page    78          x
6 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
7
8             ***** Peak power axial node output *****
9
10      time peak  burnup power  clad temp (F)  gap  fuel temp (F)  cont .
11      days node MWd/kgU kW/ft  od.  avg id.  mils  od.  avg cent  psia
12 xxx  xxxxxxx  xx  xxxxxxx  xxxxx  xxxxxxxxxxxxxxx  xxxx  xxxxxxxxxxxxxxx  xxxxx
13  1    50.0  3    2.20  6.47  618. 642. 665. 1.56  879.1279.1725. 0.
14  2   100.0  3    4.40  6.47  619. 642. 665. 0.82  782.1174.1607. 0.
15  3   150.0  3    6.60  6.47  619. 642. 666. 0.48  736.1131.1565. 0.
16  4   200.0  3    8.80  6.47  619. 642. 666. 0.24  702.1103.1541. 0.
17  5   250.0  3   11.00  6.47  619. 642. 666. 0.10  681.1092.1537. 0.
18  6   300.0  3   13.21  6.47  619. 642. 666. 0.10  681.1105.1561. 0.
19  7   350.0  3   15.41  6.47  620. 643. 667. 0.10  682.1119.1586. 0.
20  8   351.0  3   15.45  6.47  620. 643. 667. 0.10  682.1119.1587. 0.
21  9   400.0  3   17.98  7.58  633. 660. 687. 0.10  703.1247.1833. 2815.
22 10   450.0  3   20.56  7.58  634. 661. 688. 0.10  704.1264.1864. 3184.
23 11   500.0  3   23.14  7.58  636. 663. 690. 0.10  706.1281.1893. 3277.
24 12   550.0  3   25.71  7.58  637. 664. 691. 0.10  707.1298.1921. 3328.
25 13   600.0  3   28.29  7.58  638. 665. 692. 0.10  708.1314.1948. 3369.
26 14   650.0  3   30.87  7.58  640. 666. 693. 0.10  710.1329.1974. 3405.
27 15   672.0  3   32.01  7.58  640. 667. 694. 0.10  710.1335.1985. 3572.
28 16   700.0  3   33.43  7.47  630. 657. 683. 0.10  700.1321.1963. 3594.
29 17   750.0  3   35.97  7.47  632. 658. 684. 0.10  701.1334.1985. 3584.
30 18   800.0  3   38.52  7.47  633. 659. 686. 0.10  702.1347.2006. 3607.
31 19   850.0  3   41.06  7.47  634. 660. 687. 0.10  703.1359.2026. 3633.
32 20   900.0  3   43.60  7.47  635. 662. 688. 0.10  705.1372.2046. 3658.
33 21   950.0  3   46.15  7.47  637. 663. 689. 0.10  707.1384.2064. 3680.
34 22  1000.0  3   48.69  7.47  638. 664. 690. 0.10  709.1395.2082. 3700.
35 23  1050.0  3   51.23  7.47  640. 666. 692. 0.10  711.1407.2099. 3717.
36 24  1065.0  3   52.00  7.47  640. 666. 692. 0.10  712.1410.2104. 3847.
```

50

91

[illegible]

```

93 x          ***** FRAPCON-3.3 (Aug. 12 05) ***** x

```

94 x Released August 2005 x

95 x PWR Generic Fuel Rod x

96 x run date: 16-Mar-30 page 79 x

```

97 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
98
99
100          end of life strain range (percent) =      0.0161
101
102
103          fission gas cumulative fraction release = 0.157193
104
105
106
107          ZrO2 weight gain ,(gm/m**2) =   164.36

```

Quadro dos dados de saída produzido pelo FRAPCON-3.3, com todos os passos de tempo para o revestimento de M5™.

```

1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
2 x          **** FRAPCON-3.3 (Aug. 12 05) ****                      x
3 x          Released August    2005                                x
4 x PWR Generic Fuel Rod                                           x
5 x          run date: 16-Mar-30                page    78          x
6 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
7
8          ***** Peak power axial node output *****
9
10         time peak  burnup power  clad temp (F)  gap  fuel temp (F)  cont .
11         days node MWd/kgU kW/ft  od.  avg id.  mils  od.  avg cent  psia
12 xxx  xxxxxx  xx  xxxxxx  xxxxxx  xxxxxxxxxxxxxxx  xxxx  xxxxxxxxxxxxxxx  xxxxxx
13 1   50.0  3    2.20  6.47  618. 642. 665. 1.56  879.1279.1725. 0.
14 2  100.0  3    4.40  6.47  619. 642. 665. 0.82  782.1174.1607. 0.
15 3  150.0  3    6.60  6.47  619. 642. 666. 0.48  736.1131.1565. 0.
16 4  200.0  3    8.80  6.47  619. 642. 666. 0.24  702.1103.1541. 0.
17 5  250.0  3   11.00  6.47  619. 642. 666. 0.10  681.1092.1537. 0.
18 6  300.0  3   13.21  6.47  619. 642. 666. 0.10  681.1105.1561. 0.
19 7  350.0  3   15.41  6.47  619. 643. 666. 0.10  681.1118.1586. 0.
20 8  351.0  3   15.45  6.47  619. 643. 666. 0.10  681.1119.1586. 0.
21 9  400.0  3   17.98  7.58  632. 659. 686. 0.10  702.1246.1831. 2813.
22 10 450.0  3   20.56  7.58  632. 659. 687. 0.10  703.1262.1861. 3199.
23 11 500.0  3   23.14  7.58  633. 660. 687. 0.10  703.1278.1890. 3303.
24 12 550.0  3   25.71  7.58  633. 660. 688. 0.10  704.1294.1917. 3362.
25 13 600.0  3   28.29  7.58  634. 661. 688. 0.10  704.1309.1943. 3413.
26 14 650.0  3   30.87  7.58  634. 661. 689. 0.10  705.1323.1968. 3459.
27 15 672.0  3   32.01  7.58  635. 662. 689. 0.10  705.1329.1978. 3632.
28 16 700.0  3   33.43  7.47  624. 651. 678. 0.10  694.1314.1956. 3658.
29 17 750.0  3   35.97  7.47  625. 652. 678. 0.10  695.1327.1977. 3664.
30 18 800.0  3   38.52  7.47  625. 652. 679. 0.10  695.1339.1997. 3700.
31 19 850.0  3   41.06  7.47  626. 653. 679. 0.10  696.1351.2017. 3739.
32 20 900.0  3   43.60  7.47  626. 653. 680. 0.10  697.1362.2035. 3778.
33 21 950.0  3   46.15  7.47  627. 653. 680. 0.10  698.1374.2053. 3815.
34 22 1000.0 3   48.69  7.47  627. 654. 681. 0.10  699.1384.2070. 3850.
35 23 1050.0 3   51.23  7.47  628. 654. 681. 0.10  700.1395.2085. 3884.
36 24 1065.0 3   52.00  7.47  628. 655. 681. 0.10  701.1398.2090. 4020.
37 25 1100.0 3   53.77  7.46  627. 654. 680. 0.10  701.1402.2096. 4048.
38 26 1150.0 3   56.31  7.46  628. 654. 681. 0.10  702.1412.2110. 3988.
39 27 1200.0 3   58.85  7.46  628. 655. 681. 0.10  706.1424.2126. 4005.
40 28 1250.0 3   61.39  7.46  629. 655. 682. 0.10  711.1438.2144. 4041.
41 29 1300.0 3   63.92  7.46  629. 656. 682. 0.10  717.1452.2162. 4069.
42 30 1350.0 3   66.46  7.46  630. 656. 682. 0.10  720.1463.2177. 4091.

```

```

43 31 1400.0 3 69.00 7.46 630. 657. 683. 0.10 726.1477.2196. 4127.
44 32 1450.0 3 71.54 7.46 631. 657. 683. 0.10 731.1491.2214. 4153.
45 33 1500.0 3 74.08 7.46 631. 658. 684. 0.10 738.1507.2234. 4186.
46 34 1550.0 3 76.61 7.46 632. 658. 684. 0.10 745.1522.2255. 4212.
47 35 1587.0 3 78.49 7.46 632. 658. 685. 0.10 749.1533.2269. 4317.
48 36 1600.0 3 79.12 7.09 639. 664. 689. 0.10 752.1498.2194. 3858.
49 37 1650.0 3 81.53 7.09 639. 664. 689. 0.10 754.1507.2208. 4106.

```

50

```

51 clad stress strain fuel gap con press ave. ZrO2 H2
52 hoop axial pct od in B/hft2F psia fgr% mils ppm
53 xxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxx
54 -11915. -6773.-0.2561 0.32619 1198. 928. 0.0 0.05 14.5
55 -11353. -6511.-0.3872 0.32632 2196. 1007. 0.0 0.06 15.7
56 -11018. -6354.-0.4794 0.32651 3644. 1053. 0.0 0.07 16.6
57 -10710. -6210.-0.5542 0.32664 7101. 1096. 0.1 0.07 17.2
58 -10388. -6060.-0.6168 0.32699 16788. 1141. 0.1 0.08 17.8
59 -10065. -5908.-0.6706 0.32679 16884. 1186. 0.1 0.08 18.3
60 -9803. -5786.-0.7186 0.32661 16890. 1223. 0.1 0.10 20.4
61 -9742. -5758.-0.7191 0.32644 16896. 1233. 0.1 0.10 20.5
62 1895. 3704.-0.6324 0.32673 18556. 1239. 0.1 0.13 23.2
63 4746. 5490.-0.5670 0.32695 18752. 1244. 0.1 0.16 26.1
64 5518. 6002.-0.5025 0.32716 18740. 1243. 0.1 0.19 29.0
65 5967. 6410.-0.4385 0.32737 18670. 1242. 0.2 0.22 32.0
66 6345. 6798.-0.3749 0.32758 18588. 1242. 0.2 0.25 34.9
67 6695. 7168.-0.3117 0.32779 18500. 1241. 0.2 0.28 38.0
68 7983. 8547.-0.2835 0.32787 18329. 1242. 0.2 0.29 39.3
69 8183. 8764.-0.2636 0.32794 18164. 1237. 0.2 0.31 40.7
70 8234. 8820.-0.2025 0.32815 18207. 1237. 0.2 0.33 43.1
71 8517. 9124.-0.1415 0.32835 18103. 1238. 0.2 0.36 45.6
72 8825. 9454.-0.0809 0.32855 17932. 1241. 0.3 0.38 48.2
73 9131. 9783.-0.0203 0.32875 17419. 1251. 0.4 0.41 50.7
74 9424. 10099. 0.0399 0.32894 16734. 1266. 0.6 0.43 53.3
75 9704. 10400. 0.1000 0.32914 15982. 1283. 0.9 0.46 55.9
76 9970. 10686. 0.1597 0.32934 15241. 1298. 1.1 0.48 58.5
77 11012. 11796. 0.1782 0.32939 14899. 1303. 1.2 0.49 59.3
78 11228. 12058. 0.2172 0.32952 14464. 1314. 1.3 0.51 61.2
79 10789. 11577. 0.2761 0.32972 13822. 1332. 1.6 0.54 63.8
80 10940. 11732. 0.3364 0.32992 12023. 1400. 2.4 0.56 66.5
81 11228. 12029. 0.3982 0.33012 9914. 1522. 3.8 0.59 69.2
82 11461. 12287. 0.4594 0.33032 8493. 1644. 5.1 0.62 71.9
83 11648. 12475. 0.5196 0.33052 7868. 1710. 5.7 0.64 74.7
84 11944. 12791. 0.5815 0.33072 6840. 1862. 7.2 0.67 77.5
85 12168. 13027. 0.6431 0.33092 6142. 1996. 8.4 0.70 80.3
86 12444. 13320. 0.7059 0.33113 5402. 2202. 10.2 0.73 83.2
87 12667. 13539. 0.7686 0.33133 4834. 2384. 11.7 0.75 86.1
88 13488. 14438. 0.8152 0.33148 4536. 2535. 12.9 0.78 88.2
89 10011. 11036. 0.8007 0.33143 4357. 2622. 13.1 0.78 89.1
90 11910. 12914. 0.8578 0.33162 4288. 2721. 13.6 0.82 92.4

```

91

92

```

93 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

```

94 x **** FRAPCON-3.3 (Aug. 12 05) **** x

```

```

95 x Released August 2005 x

```

```

96 x PWR Generic Fuel Rod x

```

```

97 x run date: 16-Mar-30 page 79 x

```

```

98 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

99

100

```

101 end of life strain range (percent) = 0.0158

```

102


```

103
104         fission gas cumulative fraction release = 0.136273
105
106
107
108         ZrO2 weight gain ,(gm/m**2) =      56.35

```

Quadro dos dados de saída produzido pelo FRAPCON-3.3, com todos os passos de tempo para o revestimento de ZIRLO™.

```

1  xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
2  x                                     **** FRAPCON-3.3 (Aug. 12 05) ****                      x
3  x                                     Released August      2005                      x
4  x PWR Generic Fuel Rod                                                    x
5  x                               run date: 16-Mar-30                page    78                x
6  xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
7
8          *****      Peak power axial node output      *****
9
10         time peak  burnup power  clad temp (F)  gap  fuel temp (F)  cont .
11         days node MWd/kgU kW/ft  od.  avg id.  mils  od.  avg cent  psia
12 xxx  xxxxxx  xx  xxxxxxx  xxxxxx  xxxxxxxxxxxxxxx  xxxx  xxxxxxxxxxxxxxx  xxxxxx
13  1    50.0  3    2.20  6.47  618. 642. 665. 1.56  879.1279.1725.    0.
14  2   100.0  3    4.40  6.47  619. 642. 665. 0.82  782.1174.1607.    0.
15  3   150.0  3    6.60  6.47  619. 642. 666. 0.48  736.1131.1565.    0.
16  4   200.0  3    8.80  6.47  619. 642. 666. 0.24  702.1103.1541.    0.
17  5   250.0  3   11.00  6.47  619. 642. 666. 0.10  681.1092.1537.    0.
18  6   300.0  3   13.21  6.47  619. 642. 666. 0.10  681.1105.1561.    0.
19  7   350.0  3   15.41  6.47  619. 643. 666. 0.10  681.1118.1586.    0.
20  8   351.0  3   15.45  6.47  619. 643. 666. 0.10  681.1119.1586.    0.
21  9   400.0  3   17.98  7.58  632. 659. 686. 0.10  702.1246.1831.  2813.
22 10   450.0  3   20.56  7.58  632. 660. 687. 0.10  703.1262.1861.  3197.
23 11   500.0  3   23.14  7.58  633. 660. 687. 0.10  703.1279.1890.  3300.
24 12   550.0  3   25.71  7.58  634. 661. 688. 0.10  704.1294.1918.  3359.
25 13   600.0  3   28.29  7.58  634. 661. 688. 0.10  705.1309.1944.  3408.
26 14   650.0  3   30.87  7.58  635. 662. 689. 0.10  705.1324.1968.  3453.
27 15   672.0  3   32.01  7.58  635. 662. 689. 0.10  706.1330.1979.  3625.
28 16   700.0  3   33.43  7.47  625. 652. 679. 0.10  695.1315.1956.  3651.
29 17   750.0  3   35.97  7.47  626. 652. 679. 0.10  695.1328.1978.  3655.
30 18   800.0  3   38.52  7.47  626. 653. 680. 0.10  696.1340.1998.  3689.
31 19   850.0  3   41.06  7.47  627. 653. 680. 0.10  697.1352.2018.  3727.
32 20   900.0  3   43.60  7.47  627. 654. 681. 0.10  698.1363.2036.  3765.
33 21   950.0  3   46.15  7.47  628. 654. 681. 0.10  699.1375.2054.  3800.
34 22  1000.0  3   48.69  7.47  628. 655. 682. 0.10  700.1386.2071.  3834.
35 23  1050.0  3   51.23  7.47  629. 656. 682. 0.10  701.1396.2087.  3865.
36 24  1065.0  3   52.00  7.47  629. 656. 682. 0.10  702.1399.2091.  4001.
37 25  1100.0  3   53.77  7.46  629. 655. 681. 0.10  702.1404.2097.  4028.
38 26  1150.0  3   56.31  7.46  629. 656. 682. 0.10  703.1413.2111.  3966.
39 27  1200.0  3   58.85  7.46  630. 656. 682. 0.10  707.1426.2128.  3982.
40 28  1250.0  3   61.39  7.46  630. 657. 683. 0.10  714.1441.2147.  4017.
41 29  1300.0  3   63.92  7.46  631. 657. 684. 0.10  718.1453.2164.  4038.
42 30  1350.0  3   66.46  7.46  632. 658. 684. 0.10  722.1466.2180.  4062.
43 31  1400.0  3   69.00  7.46  632. 658. 685. 0.10  728.1480.2199.  4095.
44 32  1450.0  3   71.54  7.46  633. 659. 685. 0.10  734.1494.2217.  4120.
45 33  1500.0  3   74.08  7.46  633. 660. 686. 0.10  740.1509.2236.  4146.
46 34  1550.0  3   76.61  7.46  634. 660. 686. 0.10  747.1524.2257.  4173.
47 35  1587.0  3   78.49  7.46  635. 661. 687. 0.10  753.1537.2274.  4279.

```

```

48 36 1600.0 3 79.12 7.09 641. 666. 691. 0.10 753.1499.2196. 3808.
49 37 1650.0 3 81.53 7.09 642. 666. 691. 0.10 757.1510.2211. 4066.
50
51 clad stress strain fuel gap con press ave. ZrO2 H2
52 hoop axial pct od in B/hft2F psia fgr% mils ppm
53 xxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxxxx
54 -11915. -6773.-0.2561 0.32619 1198. 928. 0.0 0.05 17.5
55 -11353. -6511.-0.3872 0.32632 2196. 1007. 0.0 0.06 19.5
56 -11018. -6354.-0.4794 0.32651 3644. 1053. 0.0 0.07 20.9
57 -10710. -6210.-0.5542 0.32664 7102. 1096. 0.1 0.07 22.0
58 -10389. -6060.-0.6168 0.32699 16788. 1141. 0.1 0.08 23.0
59 -10067. -5909.-0.6706 0.32679 16884. 1187. 0.1 0.08 23.8
60 -9807. -5788.-0.7187 0.32661 16890. 1223. 0.1 0.11 27.9
61 -9747. -5760.-0.7192 0.32644 16897. 1233. 0.1 0.11 28.0
62 1900. 3708.-0.6323 0.32673 18558. 1239. 0.1 0.14 33.3
63 4739. 5481.-0.5669 0.32695 18755. 1244. 0.1 0.17 38.8
64 5504. 5987.-0.5024 0.32716 18744. 1243. 0.1 0.21 44.4
65 5947. 6389.-0.4383 0.32737 18674. 1242. 0.2 0.24 50.1
66 6320. 6770.-0.3747 0.32758 18592. 1242. 0.2 0.28 55.9
67 6662. 7134.-0.3114 0.32779 18506. 1241. 0.2 0.31 61.7
68 7949. 8511.-0.2832 0.32788 18335. 1242. 0.2 0.33 64.3
69 8146. 8724.-0.2633 0.32794 18170. 1238. 0.2 0.34 67.0
70 8185. 8768.-0.2021 0.32815 18214. 1237. 0.2 0.37 71.8
71 8461. 9063.-0.1411 0.32835 18110. 1239. 0.2 0.40 76.7
72 8761. 9385.-0.0803 0.32855 17939. 1241. 0.3 0.43 81.6
73 9059. 9705.-0.0197 0.32875 17427. 1252. 0.4 0.46 86.6
74 9344. 10012. 0.0406 0.32895 16742. 1266. 0.6 0.49 91.7
75 9615. 10303. 0.1007 0.32914 15991. 1284. 0.9 0.52 96.8
76 9873. 10580. 0.1606 0.32934 15249. 1298. 1.1 0.55 102.0
77 10917. 11692. 0.1791 0.32939 14908. 1303. 1.2 0.56 103.5
78 11123. 11943. 0.2182 0.32953 14473. 1314. 1.3 0.58 107.1
79 10671. 11447. 0.2772 0.32972 13831. 1332. 1.6 0.61 112.4
80 10819. 11593. 0.3378 0.32992 12032. 1401. 2.4 0.64 117.6
81 11112. 11904. 0.4001 0.33013 9611. 1547. 4.1 0.67 123.0
82 11293. 12103. 0.4608 0.33032 8506. 1643. 5.1 0.71 128.4
83 11503. 12299. 0.5216 0.33052 7680. 1710. 5.7 0.74 133.9
84 11779. 12602. 0.5837 0.33073 6701. 1861. 7.1 0.77 139.5
85 11999. 12855. 0.6456 0.33093 6028. 2030. 8.7 0.80 145.2
86 12225. 13083. 0.7079 0.33113 5409. 2201. 10.2 0.84 150.9
87 12463. 13328. 0.7710 0.33134 4832. 2415. 12.0 0.87 156.7
88 13308. 14157. 0.8186 0.33149 4394. 2502. 12.6 0.90 161.1
89 9721. 10792. 0.8027 0.33143 4417. 2622. 13.1 0.91 162.8
90 11710. 12716. 0.8606 0.33163 4245. 2751. 13.9 0.95 169.6
91
92 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
93 x **** FRAPCON-3.3 (Aug. 12 05) **** x
94 x Released August 2005 x
95 x PWR Generic Fuel Rod x
96 x run date: 16-Mar-30 page 79 x
97 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
98
99
100 end of life strain range (percent) = 0.0158
101
102
103 fission gas cumulative fraction release = 0.138881
104
105
106
107 ZrO2 weight gain ,(gm/m**2) = 65.89

```

Quadro dos dados de saída produzido pelo FRAPCON-3.4a, com todos os passos de tempo para o revestimento de Zircaloy-4.

```

1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
2 x                      **** FRAPCON-3.4a (Apr 27 10) ****                      x
3 x                      Released April      2010                      x
4 x PWR Generic Fuel Rod                      x
5 x                      run date: 16-Mar-30                      page 78                      x
6 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
7
8                      ***** Peak power axial node output *****
9
10 time peak burnup power clad temp (F) gap fuel temp (F) cont.
11 days node MWd/kgU kW/ft od. avg id. mils od. avg cent psia
12 xxx xxxxxx xx xxxxxx xxxxxx xxxxxxxxxxxxxxx xxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxx
13 1 50.0 3 2.20 6.47 618. 642. 665. 1.58 882.1283.1730. 0.
14 2 100.0 3 4.40 6.47 619. 642. 665. 1.16 828.1229.1673. 0.
15 3 150.0 3 6.60 6.47 619. 642. 666. 0.88 791.1197.1643. 0.
16 4 200.0 3 8.80 6.47 619. 642. 666. 0.68 764.1177.1628. 0.
17 5 250.0 3 11.00 6.47 619. 642. 666. 0.50 738.1160.1617. 0.
18 6 300.0 3 13.21 6.47 619. 642. 666. 0.32 713.1143.1606. 0.
19 7 350.0 3 15.41 6.47 620. 643. 667. 0.15 689.1128.1597. 0.
20 8 351.0 3 15.45 6.47 620. 643. 667. 0.10 682.1119.1587. 0.
21 9 400.0 3 17.98 7.58 633. 660. 687. 0.10 705.1248.1835. 0.
22 10 450.0 3 20.56 7.58 634. 661. 688. 0.10 706.1266.1866. 0.
23 11 500.0 3 23.14 7.58 636. 663. 690. 0.10 706.1282.1893. 2050.
24 12 550.0 3 25.71 7.58 637. 664. 691. 0.10 707.1298.1921. 2917.
25 13 600.0 3 28.29 7.58 638. 665. 692. 0.10 708.1313.1947. 3106.
26 14 650.0 3 30.87 7.58 640. 666. 693. 0.10 710.1328.1973. 3160.
27 15 672.0 3 32.01 7.58 640. 667. 694. 0.10 710.1335.1983. 3300.
28 16 700.0 3 33.43 7.47 630. 657. 683. 0.10 700.1320.1961. 3316.
29 17 750.0 3 35.97 7.47 632. 658. 684. 0.10 701.1333.1983. 3307.
30 18 800.0 3 38.52 7.47 633. 659. 686. 0.10 702.1346.2004. 3329.
31 19 850.0 3 41.06 7.47 634. 660. 687. 0.10 703.1358.2024. 3353.
32 20 900.0 3 43.60 7.47 635. 662. 688. 0.10 705.1370.2043. 3376.
33 21 950.0 3 46.15 7.47 637. 663. 689. 0.10 707.1382.2061. 3397.
34 22 1000.0 3 48.69 7.47 638. 664. 690. 0.10 709.1394.2078. 3415.
35 23 1050.0 3 51.23 7.47 640. 666. 692. 0.10 711.1405.2094. 3431.
36 24 1065.0 3 52.00 7.47 640. 666. 692. 0.10 712.1408.2099. 3538.
37 25 1100.0 3 53.77 7.46 640. 666. 692. 0.10 712.1413.2105. 3547.
38 26 1150.0 3 56.31 7.46 641. 667. 693. 0.10 714.1424.2119. 3486.
39 27 1200.0 3 58.85 7.46 643. 669. 694. 0.10 722.1440.2140. 3498.
40 28 1250.0 3 61.39 7.46 645. 670. 696. 0.10 729.1456.2161. 3508.
41 29 1300.0 3 63.92 7.46 646. 672. 697. 0.10 735.1470.2179. 3512.
42 30 1350.0 3 66.46 7.46 648. 673. 699. 0.10 742.1485.2198. 3524.
43 31 1400.0 3 69.00 7.46 650. 675. 700. 0.10 750.1502.2220. 3532.
44 32 1450.0 3 71.54 7.46 651. 677. 702. 0.10 757.1518.2240. 3537.
45 33 1500.0 3 74.08 7.46 653. 679. 704. 0.10 764.1534.2261. 3540.
46 34 1550.0 3 76.61 7.46 655. 680. 706. 0.10 772.1551.2283. 3543.
47 35 1587.0 3 78.49 7.46 657. 682. 707. 0.10 778.1563.2300. 3607.
48 36 1600.0 3 79.12 7.09 663. 686. 710. 0.10 779.1526.2223. 3231.
49 37 1650.0 3 81.53 7.09 665. 688. 712. 0.10 782.1536.2237. 3528.
50
51 clad stress strain fuel gap con press ave. ZrO2 H2
52 hoop axial pct od in B/hft2F psia fgr% mils ppm
53 xxxxxxxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxxx xxxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxx
54 -11921. -6776.-0.0523 0.32615 1182. 927. 0.0 0.05 19.0

```

```

55 -11648. -6649.-0.1552 0.32640 1580. 967. 0.0 0.06 21.4
56 -11360. -6514.-0.2292 0.32659 2045. 1007. 0.0 0.07 23.1
57 -11114. -6399.-0.2942 0.32671 2615. 1041. 0.1 0.07 24.5
58 -10888. -6294.-0.3553 0.32682 3540. 1075. 0.1 0.08 25.6
59 -10652. -6184.-0.4137 0.32695 5399. 1110. 0.1 0.08 26.6
60 -10399. -6066.-0.4699 0.32707 11270. 1148. 0.1 0.13 36.4
61 -10264. -6004.-0.4699 0.32726 16687. 1169. 0.1 0.13 36.6
62 -9932. -5849.-0.5304 0.32729 17005. 1214. 0.1 0.20 49.5
63 -9762. -5769.-0.5977 0.32707 16997. 1239. 0.1 0.27 63.1
64 -3736. -2365.-0.5895 0.32686 18114. 1249. 0.1 0.34 77.1
65 2724. 3545.-0.5353 0.32705 18393. 1255. 0.2 0.41 91.5
66 4151. 4596.-0.4828 0.32723 18467. 1258. 0.2 0.48 106.3
67 4572. 4931.-0.4308 0.32740 18415. 1259. 0.2 0.56 121.7
68 5637. 6059.-0.4078 0.32747 18275. 1260. 0.2 0.59 128.6
69 5767. 6186.-0.3924 0.32752 18111. 1254. 0.2 0.63 135.7
70 5716. 6124.-0.3422 0.32769 18137. 1254. 0.2 0.69 148.8
71 5911. 6332.-0.2922 0.32785 18041. 1255. 0.2 0.76 162.2
72 6125. 6561.-0.2425 0.32802 17877. 1258. 0.3 0.82 176.0
73 6334. 6783.-0.1928 0.32818 17367. 1269. 0.4 0.89 190.2
74 6527. 6989.-0.1432 0.32834 16685. 1284. 0.6 0.97 204.9
75 6705. 7178.-0.0939 0.32850 15935. 1298. 0.9 1.04 220.0
76 6868. 7352.-0.0447 0.32866 15195. 1313. 1.1 1.11 235.6
77 7737. 8277.-0.0295 0.32871 14877. 1318. 1.2 1.14 240.4
78 7825. 8393. 0.0026 0.32882 14429. 1330. 1.3 1.19 251.5
79 7385. 7908. 0.0512 0.32898 13777. 1348. 1.6 1.27 267.8
80 7525. 8040. 0.1031 0.32915 10679. 1491. 3.3 1.35 284.7
81 7652. 8182. 0.1547 0.32932 8745. 1640. 4.9 1.44 302.2
82 7740. 8243. 0.2056 0.32948 7789. 1718. 5.7 1.52 320.3
83 7891. 8423. 0.2574 0.32965 6800. 1892. 7.4 1.62 339.1
84 8017. 8520. 0.3099 0.32982 5892. 2028. 8.6 1.71 358.7
85 8129. 8672. 0.3623 0.32999 5321. 2248. 10.6 1.81 379.1
86 8222. 8749. 0.4150 0.33016 4820. 2434. 12.2 1.91 400.4
87 8324. 8846. 0.4683 0.33034 4378. 2649. 13.9 2.01 422.7
88 8934. 9473. 0.5084 0.33046 4098. 2799. 15.0 2.10 439.8
89 5882. 6556. 0.4935 0.33041 3992. 2869. 14.9 2.13 446.6
90 8363. 9020. 0.5572 0.33062 3997. 2963. 15.2 2.25 473.4
91
92 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
93 x **** FRAPCON-3.4a (Apr 27 10) **** x
94 x Released April 2010 x
95 x PWR Generic Fuel Rod x
96 x run date: 16-Mar-30 page 79 x
97 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
98
99
100 end of life strain range (percent) = 0.0115
101
102
103 fission gas cumulative fraction release = 0.152044
104
105
106
107 ZrO2 weight gain ,(gm/m**2) = 164.36
108
109 REGULATORY OUTPUT SUMMARY
110 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
111 x Rod Internal Pressure x
112 x x
113 x Initial Cold Fuel Rod Plenum Volume = 1.11514 in^3 x
114 x x

```

```

115 x    Maximum Fuel Rod Internal Pressure =    2962.52 psi      x
116 x          Peak nodal burnup           =      81.53 GWd/MTU x
117 x          Rod average burnup           =      67.85 GWd/MTU x
118 x          Fuel rod void volume         =      0.71410 in^3    x
119 x          Fission gas release           =      15.20 %       x
120 x          Time                         =    1650.000 days    x
121 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
122 x          Centerline Temperature                x
123 x                                                              x
124 x    Maximum Fuel Centerline Temperature =    2299.95 deg.F    x
125 x          Axial node                    =          3         x
126 x          Nodal burnup                  =      78.49 GWd/MTU x
127 x          Rod average burnup            =      65.21 GWd/MTU x
128 x          Time                         =    1587.000 days    x
129 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
130 x          Strain Increment                                x
131 x                                                              x
132 x    Maximum Strain Increment (elas+plas) =    0.063719 %      x
133 x          Axial node                    =          3         x
134 x          Nodal burnup                  =      81.53 GWd/MTU x
135 x          Rod average burnup            =      67.85 GWd/MTU x
136 x          Time                         =    1650.000 days    x
137 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

Quadro dos dados de saída produzido pelo FRAPCON-3.4a, com todos os passos de tempo para o revestimento de M5™.

```

1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
2 x          **** FRAPCON-3.4a (Apr 27 10) ****                      x
3 x          Released April      2010                                x
4 x    PWR Generic Fuel Rod                                          x
5 x          run date:  16-Mar-30                page    79        x
6 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
7
8
9          end of life strain range (percent) =      0.0111
10
11
12          fission gas cumulative fraction release = 0.123434
13
14
15
16          ZrO2 weight gain ,(gm/m**2) =      26.82
17
18          time peak  burnup power  clad temp (F)  gap  fuel temp (F)  cont .
19          days node MWd/kgU kW/ft  od.  avg id.  mils  od.  avg cent  psia
20 xxx  xxxxxx xx  xxxxxxx  xxxxx  xxxxxxxxxxxxxxx  xxxx xxxxxxxxxxxxxxx  xxxxx
21 1    50.0  3    2.20  6.47  621. 644. 667. 1.58  883.1284.1732. 0.
22 2    100.0  3    4.40  6.47  621. 645. 668. 1.19  833.1236.1680. 0.
23 3    150.0  3    6.60  6.47  622. 645. 668. 0.94  801.1210.1658. 0.
24 4    200.0  3    8.80  6.47  622. 646. 669. 0.76  777.1193.1647. 0.
25 5    250.0  3   11.00  6.47  622. 646. 669. 0.58  752.1177.1636. 0.
26 6    300.0  3   13.21  6.47  623. 646. 669. 0.40  728.1161.1626. 0.
27 7    350.0  3   15.41  6.47  623. 646. 669. 0.24  704.1145.1617. 0.
28 8    351.0  3   15.45  6.47  623. 646. 669. 0.14  691.1129.1599. 0.
29 9    400.0  3   17.98  7.58  635. 662. 689. 0.10  707.1251.1838. 0.
30 10   450.0  3   20.56  7.58  635. 662. 689. 0.10  707.1267.1867. 0.

```

31	11	500.0	3	23.14	7.58	635.	662.	689.	0.10	707.1283.1895.	1412.
32	12	550.0	3	25.71	7.58	636.	663.	690.	0.10	706.1296.1919.	2624.
33	13	600.0	3	28.29	7.58	636.	663.	690.	0.10	706.1310.1944.	3045.
34	14	650.0	3	30.87	7.58	636.	663.	690.	0.10	706.1324.1968.	3149.
35	15	672.0	3	32.01	7.58	636.	663.	690.	0.10	706.1330.1978.	3301.
36	16	700.0	3	33.43	7.47	626.	652.	679.	0.10	695.1315.1955.	3324.
37	17	750.0	3	35.97	7.47	626.	652.	679.	0.10	696.1327.1976.	3329.
38	18	800.0	3	38.52	7.47	626.	653.	679.	0.10	696.1339.1996.	3366.
39	19	850.0	3	41.06	7.47	626.	653.	679.	0.10	696.1350.2014.	3406.
40	20	900.0	3	43.60	7.47	626.	653.	680.	0.10	697.1361.2032.	3445.
41	21	950.0	3	46.15	7.47	626.	653.	680.	0.10	697.1372.2049.	3482.
42	22	1000.0	3	48.69	7.47	626.	653.	680.	0.10	698.1382.2064.	3518.
43	23	1050.0	3	51.23	7.47	627.	653.	680.	0.10	699.1392.2079.	3553.
44	24	1065.0	3	52.00	7.47	627.	653.	680.	0.10	700.1395.2084.	3669.
45	25	1100.0	3	53.77	7.46	626.	652.	679.	0.10	699.1399.2089.	3693.
46	26	1150.0	3	56.31	7.46	626.	652.	679.	0.10	701.1408.2102.	3652.
47	27	1200.0	3	58.85	7.46	626.	653.	679.	0.10	703.1419.2117.	3672.
48	28	1250.0	3	61.39	7.46	626.	653.	679.	0.10	707.1431.2134.	3709.
49	29	1300.0	3	63.92	7.46	626.	653.	679.	0.10	713.1445.2151.	3746.
50	30	1350.0	3	66.46	7.46	626.	653.	679.	0.10	717.1457.2168.	3774.
51	31	1400.0	3	69.00	7.46	627.	653.	680.	0.10	721.1470.2184.	3805.
52	32	1450.0	3	71.54	7.46	627.	653.	680.	0.10	727.1484.2203.	3846.
53	33	1500.0	3	74.08	7.46	627.	653.	680.	0.10	731.1497.2221.	3873.
54	34	1550.0	3	76.61	7.46	627.	653.	680.	0.10	738.1513.2242.	3913.
55	35	1587.0	3	78.49	7.46	627.	654.	680.	0.10	743.1525.2258.	4007.
56	36	1600.0	3	79.12	7.09	634.	659.	684.	0.10	745.1489.2182.	3573.
57	37	1650.0	3	81.53	7.09	634.	659.	684.	0.10	747.1498.2196.	3942.
58											

59	clad	stress	strain	fuel	gap	con	press	ave.	ZrO2	H2
60	hoop	axial	pct	od in	B/hft2F	psia	fgr%	mils	ppm	
61	xxxxxxxxxxxxxxxx	xxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx
62	-11912.	-6772.	-0.0339	0.32616	1187.	928.	0.0	0.18	33.4	
63	-11736.	-6691.	-0.1172	0.32642	1550.	961.	0.0	0.22	39.9	
64	-11535.	-6598.	-0.1822	0.32661	1927.	990.	0.0	0.26	44.4	
65	-11338.	-6505.	-0.2435	0.32674	2373.	1018.	0.1	0.29	48.0	
66	-11125.	-6406.	-0.3025	0.32686	3070.	1047.	0.1	0.29	48.9	
67	-10900.	-6301.	-0.3597	0.32698	4328.	1078.	0.1	0.30	49.8	
68	-10661.	-6189.	-0.4149	0.32710	7313.	1111.	0.1	0.31	50.7	
69	-10538.	-6131.	-0.4151	0.32708	11970.	1128.	0.1	0.31	50.7	
70	-10210.	-5978.	-0.4728	0.32747	16945.	1172.	0.1	0.31	51.9	
71	-9910.	-5837.	-0.5350	0.32726	16981.	1213.	0.1	0.32	53.1	
72	-8445.	-5134.	-0.5889	0.32705	16968.	1253.	0.1	0.33	54.4	
73	513.	2515.	-0.5351	0.32704	18263.	1266.	0.2	0.34	55.6	
74	3627.	4391.	-0.4829	0.32722	18388.	1275.	0.2	0.35	56.9	
75	4403.	4833.	-0.4316	0.32739	18363.	1276.	0.2	0.36	58.1	
76	5526.	5982.	-0.4087	0.32746	18227.	1278.	0.2	0.36	58.6	
77	5700.	6136.	-0.3936	0.32751	18059.	1275.	0.2	0.37	59.2	
78	5739.	6155.	-0.3441	0.32768	18076.	1275.	0.2	0.38	60.2	
79	6016.	6445.	-0.2947	0.32784	17971.	1277.	0.2	0.38	61.2	
80	6312.	6762.	-0.2456	0.32800	17798.	1280.	0.3	0.39	62.2	
81	6606.	7077.	-0.1966	0.32817	17282.	1291.	0.4	0.40	63.2	
82	6888.	7381.	-0.1479	0.32833	16594.	1307.	0.6	0.41	64.2	
83	7159.	7673.	-0.0994	0.32849	15840.	1326.	0.9	0.41	65.2	
84	7420.	7954.	-0.0512	0.32864	15096.	1347.	1.1	0.42	66.2	
85	8286.	8880.	-0.0363	0.32869	14778.	1356.	1.2	0.42	66.5	
86	8466.	9098.	-0.0050	0.32879	14327.	1371.	1.3	0.43	67.2	
87	8162.	8762.	0.0425	0.32895	13672.	1394.	1.6	0.44	68.2	
88	8316.	8922.	0.0908	0.32911	12404.	1444.	2.1	0.44	69.2	
89	8601.	9218.	0.1403	0.32927	10472.	1548.	3.2	0.45	70.2	
90	8878.	9514.	0.1902	0.32944	8818.	1679.	4.6	0.46	71.2	

```

91  9092.    9749.  0.2393  0.32960    7897.  1779.    5.5  0.47   72.2
92  9329.    9999.  0.2885  0.32976    7173.  1878.    6.3  0.47   73.2
93  9634.   10315.  0.3391  0.32993    6267.  2049.    7.8  0.48   74.2
94  9841.   10536.  0.3888  0.33009    5760.  2170.    8.7  0.49   75.2
95  10144.   10855.  0.4402  0.33026    5081.  2392.   10.5  0.50   76.2
96  10856.   11616.  0.4784  0.33038    4681.  2549.   11.7  0.50   77.0
97  7624.    8505.  0.4639  0.33033    4573.  2611.   11.7  0.50   77.3
98  10378.   11285.  0.5261  0.33054    4462.  2733.   12.3  0.51   78.5
99
100 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
101 x                      **** FRAPCON-3.4a (Apr 27 10) ****                      x
102 x                      Released April      2010                      x
103 x PWR Generic Fuel Rod                      x
104 x                      run date: 16-Mar-30                      page 79                      x
105 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
106
107
108                      end of life strain range (percent) =      0.0111
109
110
111                      fission gas cumulative fraction release = 0.123434
112
113
114
115                      ZrO2 weight gain ,(gm/m**2) =      26.82
116
117                      REGULATORY OUTPUT SUMMARY
118 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
119 x                      Rod Internal Pressure                      x
120 x                      x                      x
121 x      Initial Cold Fuel Rod Plenum Volume =      1.11514 in^3      x
122 x                      x                      x
123 x      Maximum Fuel Rod Internal Pressure =      2732.71 psi      x
124 x                      Peak nodal burnup =      81.53 GWd/MTU x
125 x                      Rod average burnup =      67.85 GWd/MTU x
126 x                      Fuel rod void volume =      0.68584 in^3      x
127 x                      Fission gas release =      12.34 %      x
128 x                      Time =      1650.000 days      x
129 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
130 x                      Centerline Temperature                      x
131 x                      x                      x
132 x      Maximum Fuel Centerline Temperature =      2257.75 deg.F      x
133 x                      Axial node =      3      x
134 x                      Nodal burnup =      78.49 GWd/MTU x
135 x                      Rod average burnup =      65.21 GWd/MTU x
136 x                      Time =      1587.000 days      x
137 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
138 x                      Strain Increment                      x
139 x                      x                      x
140 x      Maximum Strain Increment (elas+plas) =      0.062190 %      x
141 x                      Axial node =      3      x
142 x                      Nodal burnup =      81.53 GWd/MTU x
143 x                      Rod average burnup =      67.85 GWd/MTU x
144 x                      Time =      1650.000 days      x
145 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

Quadro dos dados de saída produzido pelo FRAPCON-3.4a, com todos os passos de tempo para o revestimento de ZIRLO™.

```

1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
2 x          **** FRAPCON-3.4a (Apr 27 10) ****                      x
3 x          Released April      2010                                x
4 x PWR Generic Fuel Rod                                           x
5 x          run date: 16-Mar-30          page 78                    x
6 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
7
8          ***** Peak power axial node output *****
9
10         time peak burnup power clad temp (F) gap fuel temp (F) cont.
11         days node MWd/kgU kW/ft od. avg id. mils od. avg cent psia
12 xxx xxxxxx xx xxxxxx xxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxx xxxx xxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxx
13 1 50.0 3 2.20 6.47 618. 642. 665. 1.58 882.1283.1730. 0.
14 2 100.0 3 4.40 6.47 619. 642. 665. 1.21 834.1237.1682. 0.
15 3 150.0 3 6.60 6.47 619. 642. 666. 0.97 802.1211.1659. 0.
16 4 200.0 3 8.80 6.47 619. 642. 666. 0.79 779.1195.1649. 0.
17 5 250.0 3 11.00 6.47 619. 642. 666. 0.63 757.1182.1642. 0.
18 6 300.0 3 13.21 6.47 619. 642. 666. 0.47 735.1169.1636. 0.
19 7 350.0 3 15.41 6.47 620. 643. 666. 0.32 714.1157.1630. 0.
20 8 351.0 3 15.45 6.47 620. 643. 666. 0.24 703.1144.1615. 0.
21 9 400.0 3 17.98 7.58 632. 659. 686. 0.10 704.1248.1834. 0.
22 10 450.0 3 20.56 7.58 633. 660. 687. 0.10 705.1265.1864. 0.
23 11 500.0 3 23.14 7.58 634. 661. 688. 0.10 706.1281.1893. 0.
24 12 550.0 3 25.71 7.58 634. 662. 689. 0.10 706.1297.1920. 1690.
25 13 600.0 3 28.29 7.58 635. 662. 689. 0.10 706.1310.1944. 2764.
26 14 650.0 3 30.87 7.58 636. 663. 690. 0.10 707.1324.1968. 3055.
27 15 672.0 3 32.01 7.58 637. 663. 690. 0.10 707.1331.1979. 3221.
28 16 700.0 3 33.43 7.47 626. 653. 680. 0.10 696.1316.1956. 3250.
29 17 750.0 3 35.97 7.47 627. 654. 680. 0.10 697.1328.1978. 3251.
30 18 800.0 3 38.52 7.47 628. 654. 681. 0.10 697.1341.1998. 3285.
31 19 850.0 3 41.06 7.47 629. 655. 682. 0.10 698.1352.2017. 3320.
32 20 900.0 3 43.60 7.47 629. 656. 682. 0.10 699.1364.2035. 3353.
33 21 950.0 3 46.15 7.47 630. 656. 683. 0.10 701.1375.2053. 3385.
34 22 1000.0 3 48.69 7.47 631. 657. 684. 0.10 702.1386.2069. 3414.
35 23 1050.0 3 51.23 7.47 631. 658. 684. 0.10 704.1397.2085. 3441.
36 24 1065.0 3 52.00 7.47 632. 658. 684. 0.10 704.1400.2089. 3554.
37 25 1100.0 3 53.77 7.46 631. 657. 684. 0.10 704.1404.2095. 3570.
38 26 1150.0 3 56.31 7.46 632. 658. 684. 0.10 706.1414.2109. 3520.
39 27 1200.0 3 58.85 7.46 633. 659. 685. 0.10 709.1425.2124. 3532.
40 28 1250.0 3 61.39 7.46 633. 660. 686. 0.10 716.1441.2144. 3562.
41 29 1300.0 3 63.92 7.46 634. 660. 687. 0.10 722.1455.2163. 3586.
42 30 1350.0 3 66.46 7.46 635. 661. 687. 0.10 724.1466.2177. 3596.
43 31 1400.0 3 69.00 7.46 636. 662. 688. 0.10 731.1481.2196. 3625.
44 32 1450.0 3 71.54 7.46 637. 663. 689. 0.10 736.1495.2215. 3643.
45 33 1500.0 3 74.08 7.46 638. 664. 690. 0.10 744.1511.2237. 3667.
46 34 1550.0 3 76.61 7.46 639. 664. 690. 0.10 751.1528.2258. 3685.
47 35 1587.0 3 78.49 7.46 639. 665. 691. 0.10 756.1539.2274. 3762.
48 36 1600.0 3 79.12 7.09 645. 670. 695. 0.10 758.1503.2197. 3359.
49 37 1650.0 3 81.53 7.09 646. 671. 696. 0.10 760.1513.2213. 3694.
50
51 clad stress strain fuel gap con press ave. ZrO2 H2
52 hoop axial pct od in B/hft2F psia fgr% mils ppm
53 xxxxxxxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxx
54 -11889. -6761.-0.0206 0.32615 1182. 931. 0.0 0.05 17.5
55 -11644. -6647.-0.1033 0.32642 1516. 967. 0.0 0.06 19.5
56 -11378. -6522.-0.1616 0.32662 1874. 1004. 0.0 0.07 20.9
57 -11147. -6414.-0.2131 0.32674 2266. 1036. 0.1 0.07 22.0
58 -10924. -6311.-0.2615 0.32687 2820. 1069. 0.1 0.08 23.0
59 -10694. -6203.-0.3079 0.32699 3711. 1102. 0.1 0.08 23.8

```



```

60 -10450. -6089.-0.3526 0.32712 5398. 1137. 0.1 0.11 29.0
61 -10343. -6040.-0.3526 0.32710 7049. 1154. 0.1 0.11 29.1
62 -9977. -5869.-0.3991 0.32767 16952. 1204. 0.1 0.15 35.7
63 -9662. -5721.-0.4501 0.32750 16987. 1247. 0.1 0.20 42.7
64 -9400. -5599.-0.4997 0.32733 16974. 1284. 0.1 0.24 49.7
65 -6398. -4094.-0.5339 0.32717 16939. 1304. 0.2 0.28 56.9
66 1563. 2917.-0.4804 0.32723 18225. 1313. 0.2 0.32 64.2
67 3735. 4296.-0.4284 0.32740 18321. 1323. 0.2 0.37 71.6
68 4976. 5494.-0.4055 0.32747 18218. 1326. 0.2 0.39 75.0
69 5202. 5656.-0.3903 0.32752 18056. 1321. 0.2 0.41 78.4
70 5217. 5610.-0.3404 0.32769 18080. 1324. 0.2 0.45 84.6
71 5486. 5882.-0.2907 0.32786 17980. 1328. 0.2 0.48 90.9
72 5767. 6179.-0.2413 0.32802 17813. 1333. 0.3 0.52 97.3
73 6039. 6470.-0.1920 0.32818 17302. 1347. 0.4 0.56 103.8
74 6297. 6745.-0.1429 0.32834 16617. 1366. 0.6 0.60 110.4
75 6540. 7006.-0.0940 0.32850 15866. 1388. 0.9 0.64 117.1
76 6769. 7251.-0.0453 0.32866 15126. 1413. 1.1 0.68 123.9
77 7653. 8195.-0.0303 0.32871 14808. 1422. 1.2 0.69 126.0
78 7785. 8358. 0.0014 0.32881 14359. 1439. 1.3 0.72 130.8
79 7421. 7956. 0.0495 0.32897 13706. 1464. 1.6 0.76 137.7
80 7545. 8077. 0.0985 0.32913 12437. 1516. 2.1 0.80 144.7
81 7809. 8327. 0.1495 0.32930 9783. 1627. 3.2 0.84 151.9
82 8026. 8586. 0.2003 0.32947 8327. 1798. 4.9 0.89 159.2
83 8141. 8723. 0.2491 0.32963 7920. 1874. 5.5 0.93 166.6
84 8406. 8982. 0.3004 0.32979 6871. 2041. 6.9 0.97 174.2
85 8591. 9172. 0.3514 0.32996 6163. 2194. 8.1 1.02 181.9
86 8823. 9411. 0.4036 0.33013 5396. 2421. 9.9 1.07 189.7
87 9010. 9587. 0.4560 0.33030 4799. 2631. 11.4 1.11 197.8
88 9671. 10303. 0.4948 0.33042 4503. 2803. 12.6 1.15 203.8
89 6522. 7270. 0.4802 0.33037 4394. 2891. 12.5 1.16 206.3
90 9194. 9952. 0.5437 0.33058 4284. 3054. 13.3 1.22 215.8
91
92 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
93 x **** FRAPCON-3.4a (Apr 27 10) **** x
94 x Released April 2010 x
95 x PWR Generic Fuel Rod x
96 x run date: 16-Mar-30 page 79 x
97 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
98
99
100 end of life strain range (percent) = 0.0108
101
102
103 fission gas cumulative fraction release = 0.132962
104
105
106
107 ZrO2 weight gain ,(gm/m**2) = 106.78
108
109 REGULATORY OUTPUT SUMMARY
110 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
111 x Rod Internal Pressure x
112 x x
113 x Initial Cold Fuel Rod Plenum Volume = 1.11514 in^3 x
114 x x
115 x Maximum Fuel Rod Internal Pressure = 3054.24 psi x
116 x Peak nodal burnup = 81.53 GWd/MTU x
117 x Rod average burnup = 67.85 GWd/MTU x
118 x Fuel rod void volume = 0.64607 in^3 x
119 x Fission gas release = 13.30 % x

```

```

120 x          Time                      = 1650.000 days x
121 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
122 x          Centerline Temperature                      x
123 x                                                                x
124 x    Maximum Fuel Centerline Temperature = 2273.52 deg.F x
125 x          Axial node                      = 3 x
126 x          Nodal burnup                    = 78.49 GWd/MTU x
127 x          Rod average burnup              = 65.21 GWd/MTU x
128 x          Time                      = 1587.000 days x
129 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
130 x          Strain Increment                      x
131 x                                                                x
132 x    Maximum Strain Increment (elas+plas) = 0.063475 % x
133 x          Axial node                      = 3 x
134 x          Nodal burnup                    = 81.53 GWd/MTU x
135 x          Rod average burnup              = 67.85 GWd/MTU x
136 x          Time                      = 1650.000 days x
137 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

Quadro dos dados de saída produzido pelo FRAPCON-3.5, com todos os passos de tempo para o revestimento de Zircaloy-4.

```

1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
2 x          **** FRAPCON-3.5 May 2014          **** x
3 x          Released April 2014 x
4 x    PWR Generic Fuel Rod x
5 x          run date: 16-Mar-30          page 78 x
6 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
7
8          ***** Peak power axial node output *****
9
10         time peak burnup power clad temp (F) RadGap fuel temp (F) cont.
11         days node MWd/kgU kW/ft od. avg id. mils od. avg cent psia
12 xxx xxxxxx xxx xxxxxxxx xxxxx xxxxxxxxxxxxxxxx xxxxx xxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxx
13 1 50.0 3 2.20 6.47 618. 642. 665. 1.61 886.1287.1735. 0.
14 2 100.0 3 4.40 6.47 619. 642. 665. 1.16 828.1229.1672. 0.
15 3 150.0 3 6.60 6.47 619. 642. 666. 0.87 789.1194.1640. 0.
16 4 200.0 3 8.80 6.47 619. 642. 666. 0.67 762.1175.1625. 0.
17 5 250.0 3 11.00 6.47 619. 642. 666. 0.53 743.1165.1623. 0.
18 6 300.0 3 13.21 6.47 619. 642. 666. 0.37 720.1151.1616. 0.
19 7 350.0 3 15.41 6.47 620. 643. 667. 0.21 698.1138.1608. 0.
20 8 351.0 3 15.45 6.47 620. 643. 667. 0.12 685.1123.1591. 0.
21 9 400.0 3 17.98 7.58 633. 660. 687. 0.10 705.1249.1835. 0.
22 10 450.0 3 20.56 7.58 634. 661. 688. 0.10 706.1266.1866. 0.
23 11 500.0 3 23.14 7.58 636. 663. 690. 0.10 707.1283.1895. 0.
24 12 550.0 3 25.71 7.58 637. 664. 691. 0.10 707.1298.1921. 2345.
25 13 600.0 3 28.29 7.58 638. 665. 692. 0.10 708.1313.1947. 2963.
26 14 650.0 3 30.87 7.58 640. 666. 693. 0.10 710.1328.1973. 3093.
27 15 672.0 3 32.01 7.58 640. 667. 694. 0.10 710.1335.1983. 3241.
28 16 700.0 3 33.43 7.47 630. 657. 683. 0.10 700.1320.1961. 3262.
29 17 750.0 3 35.97 7.47 632. 658. 684. 0.10 701.1333.1983. 3253.
30 18 800.0 3 38.52 7.47 633. 659. 686. 0.10 702.1346.2004. 3277.
31 19 850.0 3 41.06 7.47 634. 660. 687. 0.10 703.1358.2024. 3359.
32 20 900.0 3 43.60 7.47 635. 662. 688. 0.10 705.1371.2042. 3488.
33 21 950.0 3 46.15 7.47 637. 663. 689. 0.10 707.1383.2060. 3570.
34 22 1000.0 3 48.69 7.47 638. 664. 690. 0.10 709.1394.2077. 3643.

```

50

91

93 x ***** FRAPCON-3.5 May 2014 ***** x

94 x Released April 2014 x

```

95 x PWR Generic Fuel Rod x
96 x run date: 16-Mar-30 page 79 x
97 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
98
99
100 end of life strain range (percent) = 0.0157
101
102
103 fission gas cumulative fraction release = 0.152676
104
105
106
107 ZrO2 weight gain ,(gm/m**2) = 164.36
108
109 REGULATORY OUTPUT SUMMARY
110 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
111 x Rod Internal Pressure x
112 x x
113 x Initial Cold Fuel Rod Plenum Volume = 1.11514 in^3 x
114 x x
115 x Maximum Fuel Rod Internal Pressure = 3015.88 psi x
116 x Peak nodal burnup = 81.53 GWd/MTU x
117 x Rod average burnup = 67.85 GWd/MTU x
118 x Fuel rod void volume = 0.70729 in^3 x
119 x Fission gas release = 15.27 % x
120 x Time = 1650.000 days x
121 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
122 x Centerline Temperature x
123 x x
124 x Maximum Fuel Centerline Temperature = 2338.89 deg.F x
125 x Axial node = 6 x
126 x Max Rad. Ave Fuel Enthalpy = 109.65 BTU/lbm x
127 x Nodal burnup = 75.04 GWd/MTU x
128 x Rod average burnup = 65.21 GWd/MTU x
129 x Time = 1587.000 days x
130 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
131 x Strain Increment x
132 x x
133 x Maximum Strain Increment (elas+plas) = 0.309509 % x
134 x Axial node = 5 x
135 x Nodal burnup = 79.04 GWd/MTU x
136 x Rod average burnup = 67.85 GWd/MTU x
137 x Time = 1650.000 days x
138 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
139 x Fuel Melting x
140 x x
141 x Fuel has not Melted x
142 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

Quadro dos dados de saída produzido pelo FRAPCON-3.5, com todos os passos de tempo para o revestimento de M5™.

```

1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
2 x **** FRAPCON-3.5 May 2014 **** x
3 x Released April 2014 x
4 x PWR Generic Fuel Rod x
5 x run date: 16-Mar-30 page 78 x

```

[illegible]

```

66 2352. 3221.-0.4798 0.32723 18271. 1276. 0.2 0.35 56.9
67 3951. 4395.-0.4283 0.32740 18335. 1282. 0.2 0.36 58.1
68 5142. 5595.-0.4054 0.32747 18217. 1283. 0.2 0.36 58.6
69 5346. 5769.-0.3903 0.32752 18051. 1279. 0.2 0.37 59.2
70 5379. 5773.-0.3408 0.32769 18068. 1280. 0.2 0.38 60.2
71 5670. 6076.-0.2914 0.32785 17964. 1282. 0.2 0.38 61.2
72 6398. 6472.-0.2266 0.32807 17827. 1285. 0.3 0.39 62.2
73 7514. 6943.-0.1340 0.32837 17379. 1297. 0.4 0.40 63.2
74 8304. 7387.-0.0334 0.32871 16720. 1315. 0.6 0.41 64.2
75 9042. 7851. 0.0744 0.32906 15985. 1337. 0.9 0.41 65.2
76 9187. 8208. 0.1630 0.32935 15206. 1360. 1.1 0.42 66.2
77 10016. 9189. 0.1826 0.32941 14813. 1369. 1.2 0.42 66.5
78 9569. 9337. 0.2179 0.32953 14357. 1385. 1.3 0.43 67.2
79 9140. 9062. 0.2786 0.32973 13709. 1410. 1.6 0.44 68.2
80 9339. 9279. 0.3411 0.32993 12439. 1463. 2.1 0.44 69.2
81 9754. 9629. 0.4074 0.33015 10512. 1573. 3.2 0.45 70.2
82 10131. 9965. 0.4747 0.33037 8842. 1713. 4.6 0.46 71.2
83 10484. 10247. 0.5430 0.33060 7914. 1819. 5.5 0.47 72.2
84 10827. 10536. 0.6119 0.33083 7205. 1892. 6.1 0.47 73.2
85 11291. 10855. 0.6850 0.33107 6302. 2036. 7.2 0.48 74.2
86 11590. 11184. 0.7563 0.33130 5807. 2223. 8.8 0.49 75.2
87 12063. 11542. 0.8326 0.33155 5138. 2450. 10.5 0.50 76.2
88 13001. 12366. 0.8883 0.33173 4789. 2583. 11.5 0.50 77.0
89 604. -913. 0.8277 0.33149 4293. 2632. 11.4 0.50 77.3
90 6878. 5581. 0.8817 0.33170 4371. 2804. 12.2 0.51 78.5
91
92 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
93 x **** FRAPCON-3.5 May 2014 **** x
94 x Released April 2014 x
95 x PWR Generic Fuel Rod x
96 x run date: 16-Mar-30 page 79 x
97 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
98
99
100 end of life strain range (percent) = 0.0141
101
102
103 fission gas cumulative fraction release = 0.122058
104
105
106
107 ZrO2 weight gain ,(gm/m**2) = 26.82
108
109 REGULATORY OUTPUT SUMMARY
110 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
111 x Rod Internal Pressure x
112 x x
113 x Initial Cold Fuel Rod Plenum Volume = 1.11514 in^3 x
114 x x
115 x Maximum Fuel Rod Internal Pressure = 2804.25 psi x
116 x Peak nodal burnup = 81.53 GWd/MTU x
117 x Rod average burnup = 67.85 GWd/MTU x
118 x Fuel rod void volume = 0.66613 in^3 x
119 x Fission gas release = 12.21 % x
120 x Time = 1650.000 days x
121 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
122 x Centerline Temperature x
123 x x
124 x Maximum Fuel Centerline Temperature = 2255.77 deg.F x
125 x Axial node = 3 x

```

```

126 x          Max Rad. Ave Fuel Enthalpy =      101.98 BTU/lbm x
127 x          Nodal burnup                =       78.49 GWd/MTU x
128 x          Rod average burnup          =       65.21 GWd/MTU x
129 x          Time                        =    1587.000 days   x
130 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
131 x          Strain Increment                x
132 x                                          x
133 x    Maximum Strain Increment (elas+plas) =    0.112067 %    x
134 x          Axial node                    =           4      x
135 x          Nodal burnup                  =       48.34 GWd/MTU x
136 x          Rod average burnup            =       40.64 GWd/MTU x
137 x          Time                        =    1000.000 days   x
138 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
139 x          Fuel Melting                    x
140 x                                          x
141 x    Fuel has not Melted                  x
142 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

Quadro dos dados de saída produzido pelo FRAPCON-3.5, com todos os passos de tempo para o revestimento de ZIRLO™.

```

1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
2 x          **** FRAPCON-3.5 May 2014          ****          x
3 x          Released April      2014          x
4 x    PWR Generic Fuel Rod          x
5 x          run date:  16-Mar-30          page    78          x
6 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
7
8          *****    Peak power axial node output    *****
9
10         time peak  burnup power  clad temp (F) RadGap fuel temp (F)  cont .
11         days node MWd/kgU kW/ft  od.  avg id.  mils  od.  avg cent  psia
12 xxx  xxxxxx  xxx  xxxxxxxx  xxxxxx  xxxxxxxxxxxxxxxx  xxxxx xxxxxxxxxxxxxxxx  xxxxxx
13 1   50.0   3   2.20  6.47  618.  642.  665.  1.61  886.1288.1735.    0.
14 2  100.0   3   4.40  6.47  619.  642.  665.  1.21  835.1237.1683.    0.
15 3  150.0   3   6.60  6.47  619.  642.  666.  0.96  801.1209.1657.    0.
16 4  200.0   3   8.80  6.47  619.  642.  666.  0.78  777.1193.1647.    0.
17 5  250.0   3  11.00  6.47  619.  642.  666.  0.66  760.1186.1647.    0.
18 6  300.0   3  13.21  6.47  619.  642.  666.  0.51  740.1175.1643.    0.
19 7  350.0   3  15.41  6.47  620.  643.  666.  0.37  720.1164.1639.    0.
20 8  351.0   3  15.45  6.47  620.  643.  666.  0.29  710.1152.1625.    0.
21 9  400.0   3  17.98  7.58  632.  659.  686.  0.10  704.1248.1834.    0.
22 10 450.0   3  20.56  7.58  633.  660.  687.  0.10  705.1265.1864.    0.
23 11 500.0   3  23.14  7.58  634.  661.  688.  0.10  706.1281.1893.    0.
24 12 550.0   3  25.71  7.58  634.  662.  689.  0.10  706.1297.1920.    0.
25 13 600.0   3  28.29  7.58  635.  662.  689.  0.10  707.1312.1946.  1966.
26 14 650.0   3  30.87  7.58  636.  663.  690.  0.10  707.1325.1969.  2862.
27 15 672.0   3  32.01  7.58  637.  663.  690.  0.10  707.1331.1979.  3104.
28 16 700.0   3  33.43  7.47  626.  653.  680.  0.10  696.1316.1956.  3168.
29 17 750.0   3  35.97  7.47  627.  654.  680.  0.10  697.1328.1978.  3184.
30 18 800.0   3  38.52  7.47  628.  654.  681.  0.10  697.1341.1998.  3223.
31 19 850.0   3  41.06  7.47  629.  655.  682.  0.10  698.1352.2017.  3312.
32 20 900.0   3  43.60  7.47  629.  656.  682.  0.10  699.1364.2035.  3447.
33 21 950.0   3  46.15  7.47  630.  656.  683.  0.10  701.1376.2053.  3541.
34 22 1000.0  3  48.69  7.47  631.  657.  684.  0.10  702.1387.2069.  3629.
35 23 1050.0  3  51.23  7.47  631.  658.  684.  0.10  704.1398.2085.  3644.
36 24 1065.0  3  52.00  7.47  632.  658.  684.  0.10  704.1401.2089.  3756.

```

50

91

[illegible]

```

93 x          ***** FRAPCON-3.5  May 2014          ***** x

```

94 x Released April 2014 x

95 x PWR Generic Fuel Rod x

```
96 x          run date:   16-Mar-30           page    79           x
```


[illegible]

Referências Bibliográficas

- Adamson et al.(2003)** Ron Adamson, Brian Cox, Peter Rudling e Gunnar Wikmark. ZIRAT-8 ANNUAL REPORT. Citado na pág. [11](#)
- Berna et al.(1997)** Gary A Berna, GA Beyer, KL Davis e DD Lanning. FRAPCON-3: A computer code for the calculation of steady-state, thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup. Relatório técnico, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Systems Technology; Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States); Idaho National Engineering Lab., Idaho Falls, ID (United States). Citado na pág. [2](#), [18](#), [19](#), [20](#), [26](#), [30](#), [31](#), [32](#), [33](#), [34](#), [35](#)
- Cazalis et al.(2005)** B Cazalis, C Bernaudat, P Yvon, J Desquines, C Poussard e X Averty. The PROMETRA program: a reliable material database for highly irradiated Zircaloy-4, ZIRLO TM and M5 TM fuel cladding. Em *Proceedings of the 18th international conference on structural mechanics in reactor technology (SMiRT 18)*, number C02-1. Citado na pág. [i](#), [17](#)
- Garner e Mardon(2011)** G. L. Garner e J. P. Mardon. Alloy M5 cladding performance update. *Nuclear Engineering International*. Citado na pág. [12](#)
- Geelhood et al.(2011a)** KJ Geelhood, Walter G Luscher, CE Beyer et al. *FRAPCON-3.4: A Computer Code for the Calculation of Steady State Thermal-mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup*, volume 1 of NUREG/CR-7022. US Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research Richland, WA. Citado na pág. [2](#), [21](#), [26](#), [27](#), [28](#), [29](#), [30](#), [31](#), [32](#), [35](#), [36](#), [37](#), [38](#)
- Geelhood et al.(2011b)** KJ Geelhood, WG Luscher, CE Beyer e JM Cuta. *FRAPTRAN 1.4: a computer code for the transient analysis of oxide fuel rods*. US Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research. Citado na pág. [2](#)
- Geelhood et al.(2014)** KJ Geelhood, Walter Luscher, CE Beyer et al. *FRAPCON-3.5: A Computer Code for the Calculation of Steady State Thermal-mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup*, volume 1 of NUREG/CR-7022. US Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research Richland, WA. Citado na pág. [ii](#), [2](#), [19](#), [21](#), [23](#), [24](#), [25](#), [28](#), [29](#), [31](#), [32](#), [33](#), [34](#), [35](#), [36](#), [38](#), [39](#)
- Hagrman e Reymann(1979)** Donald L Hagrman e Gregory A Reymann. MATPRO-VERSION 11: a handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior. Relatório técnico, Idaho National Engineering Lab., Idaho Falls (USA). Citado na pág. [31](#)
- IAEA(1993)** INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY IAEA. Impact of Extended Burnup on the Nuclear Fuel Cycle. *Proceedings of an Advisory Group Meeting*, (IAEA-TECDOC-699). Citado na pág. [4](#), [5](#)

- IAEA et al.(1998)** INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY IAEA et al. Water-side corrosion of zirconium alloys in nuclear power plants. Relatório Técnico TECDOC-996. Citado na pág. 16
- Jacobs e Todreas(1973)** Gary Jacobs e Neil Todreas. Thermal contact conductance in reactor fuel elements. *Nuclear science and engineering*, 50(3):283–290. Citado na pág. 17, 30
- Jernkvist e Massih(2004)** Lars Olof Jernkvist e Ali R Massih. *Models for fuel rod behaviour at high burnup*. Statens kärnkraftinspektion. Citado na pág. 5, 6, 7, 8, 12, 16, 17
- Jernkvist e Massih(2002)** Lars Olof Jernkvist e AR Massih. Analysis of the effect of UO₂ high burnup microstructure on fission gas release. *SKI report*, 2:56. Citado na pág. 22, 23, 24
- Kim et al.(2010)** Hyung Hoon Kim, Jun Ho Kim, Jin Young Moon, Ho Seong Lee, Jeong Joo Kim e Young Suck Chai. High-temperature oxidation behavior of zircaloy-4 and zirlo in steam ambient. *Journal of Materials Science & Technology*, 26(9):827–832. Citado na pág. i, 12, 13, 14
- Lamarsh(1966)** John R Lamarsh. *Introduction to nuclear reactor theory*. Addison-Wesley Publishing Company. Citado na pág. 7
- Lanning et al.(2005)** D. D. Lanning, C. E. Beyer e K.J.Geelhood. FRAPCON-3 Updates, Including Mixed-Oxide Fuel Properties. Relatório técnico, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Systems Technology; Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States); Idaho National Engineering Lab., Idaho Falls, ID (United States). Citado na pág. 2, 20, 31, 32, 35, 36, 38
- Lanning et al.(1997)** DD Lanning, CE Beyer e CL Painter. FRAPCON-3: modifications to fuel rod material properties and performance models for high-burnup application. Relatório técnico, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Systems Technology; Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States). Citado na pág. 33, 34, 36
- Lassmann et al.(1994)** K Lassmann, C O'carroll, J Van de Laar e CT Walker. The radial distribution of plutonium in high burnup UO₂ fuels. *Journal of Nuclear Materials*, 208(3):223–231. Citado na pág. 30
- Lassmann et al.(1995)** K Lassmann, CT Walker, J Van de Laar e F Lindström. Modelling the high burnup UO₂ structure in LWR fuel. *Journal of Nuclear Materials*, 226(1):1–8. Citado na pág. 5
- Lassmann et al.(1998a)** K Lassmann, CT Walker e J van de Laar. Extension of the TRANSURANUS burnup model to heavy water reactor conditions. *Journal of nuclear materials*, 255(2):222–233. Citado na pág. 33
- Lassmann et al.(1998b)** K Lassmann, CT Walker e J van de Laar. Extension of the TRANSURANUS burnup model to heavy water reactor conditions. *Journal of nuclear materials*, 255(2):222–233. Citado na pág. 18
- Lucuta et al.(1996)** PG Lucuta, Hj Matzke e IJ Hastings. A pragmatic approach to modelling thermal conductivity of irradiated UO₂ fuel: review and recommendations. *Journal of nuclear materials*, 232(2):166–180. Citado na pág. 31, 33
- Matzke(1995)** Hj Matzke. The rim-effect in high burnup UO₂ nuclear fuel. In P. Vicenzini (ed), *Ceramics: Charting the Future, World Ceramics Congress*, (1):2913–2920. Citado na pág. 5

- Mogensen et al.(1985)** M Mogensen, CT Walker, ILF Ray e M Coquerelle. Local fission gas release and swelling in water reactor fuel during slow power transients. *Journal of nuclear materials*, 131(2):162–171. Citado na pág. [i](#), [7](#), [8](#), [32](#), [33](#)
- Mogensen et al.(1999)** M Mogensen, JH Pearce e CT Walker. Behaviour of fission gas in the rim region of high burn-up UO₂ fuel pellets with particular reference to results from an XRF investigation. *Journal of Nuclear Materials*, 264(1):99–112. Citado na pág. [5](#)
- Olander(1976)** Donald R Olander. Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements. Relatório técnico, California Univ., Berkeley (USA). Dept. of Nuclear Engineering. Citado na pág. [5](#), [7](#)
- Owaki et al.(2001)** M Owaki, N Ikatsu, K Ohira e N Itagaki. Development of a fuel rod thermal-mechanical analysis code for high burnup fuel. Citado na pág. [31](#)
- Rapier et al.(1963)** AC Rapier, TM Jones e JE McIntosh. The thermal conductance of uranium dioxide/stainless steel interfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 6(5):397–416. Citado na pág. [30](#)
- Reis(2014)** Regis Reis. Análise do Comportamento sob Irradiação do Combustível Nuclear a Altas Queimas Com os Programas Computacionais FRAPCON e FRAPTRAN. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN- São Paulo. Citado na pág. [3](#)
- Ronchi et al.(2004)** C Ronchi, M Sheindlin, D Staicu e M Kinoshita. Effect of burn-up on the thermal conductivity of uranium dioxide up to 100.000 MWd/t. *Journal of Nuclear Materials*, 327(1):58–76. Citado na pág. [i](#), [9](#), [11](#)
- Rondinella e Wiss(2010)** Vincenzo V. Rondinella e Thierry Wiss. The high burn-up structure in nuclear fuel. *Materials Today*, 12(13). Citado na pág. [i](#), [5](#), [6](#), [7](#)
- Ross e Stoute(1962)** AM Ross e RL Stoute. Heat transfer coefficient between UO₂ and Zircaloy-2. *AECL-1552*. Citado na pág. [30](#)
- Soba e Denis(2015)** Alejandro Soba e Alicia Denis. DIONISIO 2.0: New version of the code for simulating a whole nuclear fuel rod under extended irradiation. *Nuclear Engineering and Design*, 292:213–221. Citado na pág. [18](#)
- Spino et al.(1996)** J Spino, K Vennix e M Coquerelle. Detailed characterisation of the rim microstructure in PWR fuels in the burn-up range 40–67 GWd/tM. *Journal of Nuclear Materials*, 231(3):179–190. Citado na pág. [5](#)
- Staicu et al.(2014)** D Staicu, VV Rondinella, CT Walker, D Papaioannou, RJM Konings, C Ronchi, M Sheindlin, A Sasahara, T Sonoda e M Kinoshita. Effect of burn-up on the thermal conductivity of uranium–gadolinium dioxide up to 100GWd/tHM. *Journal of Nuclear Materials*, 453(1):259–268. Citado na pág. [9](#)
- Steinbrück et al.(2011)** Martin Steinbrück, Nóra Vér e Mirco Große. Oxidation of Advanced Zirconium Cladding Alloys in Steam at Temperatures in the Range of 600–1200 C. *Oxidation of metals*, 76(3-4):215–232. Citado na pág. [i](#), [iii](#), [12](#), [15](#), [16](#)
- Unal et al.(2013)** C Unal, CJ Stull e BJ Williams. Parametric Uncertainty in a Thermal Conductivity Model of Uranium Oxide Light Water Nuclear Reactor Fuel. *Review of Applied Physics*. Citado na pág. [31](#)
- Walker et al.(1988)** CT Walker, P Knappik e M Mogensen. Concerning the development of grain face bubbles and fission gas release in UO₂ fuel. *Journal of Nuclear Materials*, 160(1):10–23. Citado na pág. [5](#)

Walker et al.(2006) CT Walker, D Staicu, M Sheindlin, D Papaioannou, W Goll e F Sontheimer. On the thermal conductivity of UO_2 nuclear fuel at a high burn-up of around 100MWd/kgHM. *Journal of Nuclear Materials*, 350(1):19–39. Citado na pág. [i](#), [9](#), [10](#)