INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Aplicação de métodos não destrutivos para qualificação de
combustíveis tipo dispersão de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al no reator IEA-R1**

José Eduardo Rosa da Silva

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Reatores**

**Orientador:
Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva**

**SÃO PAULO
2011**

*Dedico este trabalho
aos meus pais, **José e Lucinda**,
à minha esposa **Adaci** e à minha filha **Raquel Helena**,
por tudo o que representam para mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho e, em particular:

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP), pela oportunidade que me foi concedida para realizar os meus estudos e trabalho de doutorado.

Ao Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva, pela orientação e pelo enriquecimento do trabalho proporcionado por seus comentários, bem como pelo seu incentivo, colaboração e apoio que foram muito importantes para a realização deste trabalho.

Aos membros titulares e suplentes da Comissão Julgadora do Exame da Tese - Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva (orientador, IPEN), Prof. Dr. Luís Antonio Albiac Terremoto (IPEN), Prof. Dr. José Augusto Perrotta (IPEN), Prof. Dr. João Manoel Losada Moreira (UFABC), Prof. Dr. Donizete Anderson Alencar (CDTN), Profa. Dra. Iraci Martinez P. Gonçalves (IPEN), Dr. Delvonei Alves de Andrade (IPEN), Profa. Dra. Elita Urano Frajndlich (IPEN), Prof. Dr. Jorge Luiz Cachoeira Chapot (ELETRONUCLEAR) e Prof. Dr. Wilmar Barbosa Ferraz (CDTN).

Ao Prof. Dr. José Augusto Perrotta, pelo incentivo e apoio à realização do meu trabalho de doutorado, que sempre me dedicou.

Ao saudoso amigo, Prof. Dr. Georgi Lucki (in memoriam), pelo seu incentivo para a realização deste trabalho.

Aos colegas do Grupo de Engenharia do Combustível do Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do IPEN/CNEN-SP, Prof. Dr. Luís Antonio Albiac Terremoto, Sr. Orlando Nogueira da Silva, Dra. Myrthes Castanheira e Dr. Celso Antonio Teodoro, pelo apoio na elaboração deste trabalho e valiosos incentivos.

Aos colegas M.Sc. Mitsuo Yamagushi e M.Sc. Pedro Ernesto Umbehaun, pelo apoio nos direcionamentos das análises neutrônicas e termohidráulicas.

Ao bolsista Douglas Borges Domingos, pela colaboração na realização de medidas na piscina do reator e dedicado empenho na execução de casos com os programas computacionais CITATION e MTRCR-IEAR1.

Aos meus pais, Sr. José Rosa da Silva e Sra. Lucinda Rui da Silva, pelo imenso amor e confiança recebidos e, aos meus familiares, pela compreensão, incentivo e torcida.

À minha esposa Adací e à minha filha Raquel Helena, pelo amor, compreensão e apoio durante a elaboração deste trabalho.

A Deus, por tudo o que me tem concedido.

*"Não basta saber, é preciso também praticar; não basta querer,
é preciso também fazer."*
J.W. Goethe

**Aplicação de Métodos Não Destrutivos Para Qualificação de Combustíveis Tipo
Dispersão de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al no Reator IEA-R1**

José Eduardo Rosa da Silva

RESUMO

O IPEN/CNEN-SP fabrica combustíveis para uso no seu reator nuclear de pesquisas, o IEA-R1. Para qualificar os seus combustíveis tem que comprovar o bom desempenho destes sob irradiação. Como o Brasil não possui reator nuclear de pesquisa com altos fluxos de nêutrons ou células quentes apropriadas para a realização de exames pós-irradiação de combustíveis nucleares, o IPEN/CNEN-SP conduziu um programa de qualificação operacional de elementos combustíveis empregando compostos de urânio já internacionalmente testados sob irradiação e qualificados para uso em reatores de pesquisas, obtendo experiência nas etapas de desenvolvimento tecnológico de fabricação de placas combustíveis, irradiação e ensaios não destrutivos pós-irradiação. Foram fabricados e irradiados diretamente no núcleo do IEA-R1, com sucesso, elementos combustíveis contendo dispersões com baixas frações volumétricas de combustível. Entretanto, existem planos no IPEN/CNEN-SP para aumentar a densidade de urânio dos seus combustíveis. O objetivo deste trabalho de tese consistiu no estudo e proposição de aplicação de um conjunto de métodos não destrutivos para a qualificação dos combustíveis a dispersão de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al com alta densidade de urânio fabricados no IPEN/CNEN-SP. Para tanto, foram considerados os recursos de irradiação e a aplicação, na piscina do reator IEA-R1, de métodos não destrutivos disponíveis na Instituição. A proposta consiste em especificar, fabricar e irradiar miniplacas combustíveis, nas densidades máximas já qualificadas internacionalmente e efetuar acompanhamento das condições gerais das mesmas, ao longo do período de irradiação, por meio de métodos não destrutivos na piscina do reator. Além dos métodos de inspeção visual e de *sipping* já empregados na Instituição, foi concluída a infraestrutura para realização de ensaios dimensionais sub-aquáticos para a avaliação do inchamento das miniplacas combustíveis irradiadas. As análises dos resultados darão subsídios para avaliar e decidir a continuidade ou não das irradiações das miniplacas, até que sejam alcançadas as queimas estipuladas para os testes de irradiação no IEA-R1.

Application of Non-Destructive Methods for Qualification of the U_3O_8 -Al and U_3Si_2 -Al Dispersion Fuels in the IEA-R1 Reactor

José Eduardo Rosa da Silva

ABSTRACT

IPEN/CNEN-SP manufactures fuels to be used in its nuclear research reactor – the IEA-R1. To qualify those fuels, it is necessary to check if they have a good performance under irradiation. As Brazil doesn't have nuclear research reactors with high neutron fluxes, or suitable hot cells for carrying out post-irradiation examination of nuclear fuels, IPEN/CNEN-SP has conducted a fuel qualification program based on the use of uranium compounds, internationally tested and qualified to be used in research reactors, and has gotten experience in the technological development stages for the manufacturing of fuel plates, irradiation and non-destructive post-irradiation testing. Fuel elements containing low volume fractions of fuel in the dispersion were manufactured and irradiated successfully directly in the core of the IEA-R1. However, there are plans to increase the uranium density of these fuels. The objective of this thesis work was to study and to propose a set of non-destructive methods to qualify the dispersions fuels U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al with high uranium density produced at IPEN/CNEN-SP. For that, the irradiation resources in the IEA-R1, and the application of non-destructive methods in the reactor pool available in the Institution were considered. The proposal is to specify, manufacture and irradiate fuel miniplates in IEA-R1 at the maximum densities, qualified internationally, and to monitor their general conditions during the period of irradiation, using non-destructive methods in the reactor pool. In addition to the non-destructives visual inspection and sipping methods, already used at the Institution, the infrastructure for dimensional sub-aquatic testing to evaluate the swelling of irradiated fuel miniplates was completed. The analyses of the results will provide means to assess and decide whether or not to continue with the irradiation of miniplates, until the desired burnup for the irradiation tests at IEA-R1 are reached.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas.....	VII
Lista de Figuras.....	IX
Lista de Abreviaturas e/ou Siglas	XI
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Breve histórico	13
1.2. Objetivo da tese	15
1.3. Estrutura do trabalho.....	16
1.4. Aspectos relevantes e originalidade	17
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	19
3. RESUMO DA TEORIA E DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE QUALIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES PARA MTR.....	28
3.1. Considerações sobre os combustíveis nucleares para MTR.....	28
3.1.1. <i>Fundamentos dos combustíveis a dispersão</i>	29
3.1.2. <i>Combustíveis a dispersão empregados no IPEN/CNEN-SP</i>	32
3.2. Principais fenômenos que ocorrem no combustível nuclear durante a irradiação.....	33
3.2.1. <i>Densificação da partícula combustível</i>	34
3.2.2. <i>Inchamento do combustível</i>	34
3.2.2.1. <i>Inchamento do U_3O_8-Al</i>	36
3.2.2.2. <i>Inchamento do U_3Si_2-Al</i>	37
3.2.3. <i>Deterioração da ligação metalúrgica na interface cerne - revestimento</i>	39
3.2.4. <i>Reações químicas entre a partícula combustível e a matriz</i>	40
3.2.4.1. <i>Reações químicas nas dispersões U_3O_8-Al</i>	40
3.2.4.2. <i>Reações químicas nas dispersões U_3Si_2-Al</i>	41
3.2.5. <i>Liberação de produtos de fissão</i>	42
3.2.6. <i>Inchamento e endurecimento das ligas de Al</i>	43
3.2.7. <i>Corrosão do revestimento</i>	44
3.2.7.1. <i>Corrosão uniforme</i>	46
3.2.7.2. <i>Corrosão por pite</i>	47
3.2.7.3. <i>Fatores que influenciam a corrosão do Al</i>	47
3.2.7.4. <i>Aspecto das camadas de óxido sobre o EC irradiado</i>	49
3.2.7.5. <i>Corrosão do revestimento nas condições operacionais do IEA-R1</i>	50
3.3. Métodos para desenvolvimento e qualificação de combustíveis	50
3.3.1. <i>Fase I – Pesquisa e desenvolvimento</i>	51
3.3.1.1. <i>Testes de irradiação de miniplacas combustíveis</i>	52
3.3.1.2. <i>Testes de irradiação de placas combustíveis de tamanho integral</i>	54
3.3.2. <i>Fase II – Qualificação do desempenho sob irradiação</i>	55
3.3.2.1. <i>Testes de irradiação de EC protótipos</i>	56
3.3.2.2. <i>PIE de EC protótipos</i>	56
3.3.3. <i>Novas aplicações de combustíveis previamente qualificados</i>	57
3.3.4. <i>Requisitos dos testes para qualificação</i>	58
3.4. Informações relevantes para a qualificação obtidas na fase de desenvolvimento	59

3.4.1.	<i>Propriedades básicas do combustível não-irradiado.....</i>	59
3.4.2.	<i>Propriedades pré-irradiação do cerne e da miniplaca combustível.....</i>	60
3.4.3.	<i>Outros parâmetros e propriedades de irradiação da miniplaca combustível.....</i>	60
3.4.3.1.	<i>Densidade de fissões no cerne.....</i>	60
3.4.3.2.	<i>Determinação da temperatura limiar para empolamento.....</i>	62
3.4.3.3.	<i>Integridade mecânica da interface revestimento-cerne.....</i>	63
3.4.4.	<i>Demonstração do bom desempenho sob irradiação.....</i>	63
3.5.	<i>Principais PIE de combustíveis de MTR.....</i>	64
3.5.1.	<i>Inspeção visual.....</i>	66
3.5.1.1.	<i>Particularidades e limitações.....</i>	67
3.5.1.2.	<i>Fatores que influenciam as inspeções visuais de combustíveis.....</i>	68
3.5.1.3.	<i>Câmeras de vídeo subaquáticas para inspeção visual.....</i>	68
3.5.2.	<i>Sipping.....</i>	69
3.5.3.	<i>Espectrometria de raios-gama.....</i>	70
3.5.4.	<i>Medidas dimensionais do combustível irradiado.....</i>	71
3.6.	<i>Experiência alcançada na qualificação de combustíveis com baixa concentração de urânio produzidos no IPEN/CNEN-SP.....</i>	71
4.	APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS NA PISCINA DO REATOR IEA-R1.....	75
4.1.	<i>Proposta de aplicação de métodos não destrutivos para a qualificação de combustíveis tipo dispersão de U_3O_8-Al e U_3Si_2-Al de alta densidade de urânio no reator IEA-R1.....</i>	75
4.1.1.	<i>Crêterios para a condução dos testes de irradiação, inspeções e medidas.....</i>	76
4.1.2.	<i>Frequência das inspeções visuais e medições de espessura.....</i>	76
4.1.3.	<i>Armazenamento de miniplacas irradiadas.....</i>	77
4.1.4.	<i>Procedimento em caso de falha.....</i>	77
4.2.	<i>Infraestrutura disponível para irradiação e ensaios não destrutivos.....</i>	78
4.2.1.	<i>Reator IEA-R1.....</i>	78
4.2.2.	<i>Infraestrutura para END.....</i>	79
4.2.2.1.	<i>Inspeção visual.....</i>	79
4.2.2.2.	<i>Ensaio de sipping.....</i>	83
4.2.2.3.	<i>Medida de queima por espectrometria de raios-gama.....</i>	85
4.2.3.	<i>Miniplacas combustíveis para os testes de irradiação.....</i>	85
4.3.	<i>Desenvolvimento de infraestrutura para irradiação e medição de espessura de miniplacas.....</i>	88
4.3.1.	<i>Dispositivo para irradiação de miniplacas - DIM.....</i>	89
4.3.1.1.	<i>Avaliação neutrônica.....</i>	91
4.3.1.2.	<i>Avaliação termohidráulica.....</i>	95
4.3.2.	<i>Sistema de medida de espessura de miniplacas combustíveis - SMEMC.....</i>	96
4.3.2.1.	<i>Características construtivas e equipamentos.....</i>	96
4.3.2.2.	<i>Instalação das sondas na bancada.....</i>	98
4.3.2.3.	<i>Comissionamento do equipamento.....</i>	98
4.3.2.4.	<i>Procedimento para medição de espessura.....</i>	102
4.4.	<i>Metodologia para cálculo do inchamento do cerne.....</i>	108
4.5.	<i>Considerações adicionais sobre os ensaios de inspeção visual de miniplacas irradiadas.....</i>	109
4.6.	<i>Avaliação da espessura da camada de óxido durante inspeção visual.....</i>	109
5	RESULTADOS.....	112
5.1	<i>Caracterização pré-irradiação das miniplacas combustíveis.....</i>	112
5.1.1.	<i>Registro dimensional.....</i>	112
5.1.2.	<i>Registro fotográfico.....</i>	115

5.2. Condições da irradiação	116
5.2.1. Carregamento das miniplacas no DIM	116
5.2.2. Início da irradiação	117
5.3. Parâmetros neutrônicos calculados para as miniplacas.....	117
5.3.1. Fluxo de nêutrons.....	117
5.3.2. Taxas de fissões (densidades de potência geradas)	123
5.4. Tempos de irradiação e densidade de fissões nas miniplacas.....	124
5.5. Estimativa da atividade da miniplaca após a irradiação.....	133
6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	138
6.1. Discussão	138
6.2. Conclusões	141
6.3. Sugestões para desenvolvimentos futuros	141
I APÊNDICES	143
APÊNDICE A – Ficha de registro de ensaio dimensional de miniplaca irradiada.....	143
APÊNDICE B - Tempos de irradiação das miniplacas, conforme configuração do carregamento no núcleo do IEA-R1, pos. 36 da placa matriz.	144
APÊNDICE C – Estudo de caso: remanejamento das miniplacas no DIM.....	148
APÊNDICE D – Estudo de caso: remanejamento do DIM para a posição 65 da PM.....	154
APÊNDICE E – Sumário dos parâmetros neutrônicos e termohidráulicos da irradiação das miniplacas no IEA-R1	160
II A N E X O S	162
ANEXO A – Dados operacionais termohidráulicos do reator IEA-R1 para operação a 5 MW	162
ANEXO B – Relações de densidade de urânio para combustíveis óxidos e silicetos.	163
ANEXO C – Alguns EC irradiados no IEA-R1 e queimas alcançadas.....	165
GLOSSÁRIO	166
REFERÊNCIAS	169

Lista de Tabelas

TABELA 1 - Densidades de alguns compostos de urânio utilizados como combustível nuclear.	29
TABELA 2 - Nuclídeos mais indicados para uso como monitores de queima.	71
TABELA 3 - Queimas alcançadas pelos EC protótipos dos combustíveis de U_3O_8 -Al com 1,9 e 2,3 gU/cm ³ e de U_3Si_2 -Al com 3,0 gU/cm ³ irradiados no reator IEA-R1.	72
TABELA 4 - Parâmetros gerados com o CITATION para o DIM com 10 miniplacas de U_3Si_2 -Al com 4,8 gU/cm ³ , na posição 36 (5,0 MW).	93
TABELA 5 - Equipamentos da bancada do SMEMC.	97
TABELA 6 - Medidas de espessura de miniplaca dummy obtidas durante medições realizadas fora da piscina, para o comissionamento do SMEMC.	100
TABELA 7 - Medidas de espessura da miniplaca dummy obtidas no primeiro, segundo e terceiro conjuntos de medições, dentro da piscina, para o comissionamento do SMEMC.	101
TABELA 8 - Medidas de espessura da miniplaca dummy obtidas no quarto e quinto conjuntos de medições, dentro da piscina, para o comissionamento do SMEMC.	102
TABELA 9 - Características pré-irradiação das miniplacas combustíveis fabricadas pelo IPEN/CNEN-SP (Si = U_3Si_2 ; Ox = U_3O_8).	113
TABELA 10 - Médias das medidas de espessura obtidas nas miniplacas de U_3Si_2 -Al, antes da irradiação.	114
TABELA 11 - Médias das medidas de espessura obtidas nas miniplacas de U_3O_8 -Al, antes da irradiação.	114
TABELA 12 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3O_8 -Al, com 2,3 gU/cm ³ (posições 10 ^a e 9 ^a do estojo). DIM na posição 36. Reator a 4,0 MW.	118
TABELA 13 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3O_8 -Al, com 3,2 gU/cm ³ (posições 8 ^a , 7 ^a e 6 ^a do estojo). DIM na posição 36. Reator a 4,0 MW.	119
TABELA 14 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3Si_2 -Al, com 3,1 gU/cm ³ (posições 5 ^a e 4 ^a do estojo). DIM na posição 36. Reator a 4,0 MW.	121
TABELA 15 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3Si_2 -Al, com 4,8 gU/cm ³ (posições 3 ^a , 2 ^a e 1 ^a do estojo). DIM na posição 36. Reator a 4,0 MW.	122
TABELA 16 – Produto (v. Σ_f) gerado pelo programa CITATION para as miniplacas combustíveis, para a configuração 246 do núcleo do reator IEA-R1.	124
TABELA 17 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2 -Al, com 4,8 gU/cm ³ (V_f = 42,5%). Canaletas 1, 2 e 3 do estojo. (4 MW).	125
TABELA 18 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2 -Al, com 3,1 gU/cm ³ (V_f = 27%). Canaletas 4 e 5 do estojo. (4 MW).	125
TABELA 19 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8 -Al, com 3,2 gU/cm ³ (V_f = 45,7%). Canaletas 6, 7 e 8 do estojo. (4 MW).	126
TABELA 20 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8 -Al, com 2,3 gU/cm ³ (V_f = 33%). Canaletas 9 e 10 do estojo. (4 MW).	126
TABELA 21 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2 -Al, com 4,8 gU/cm ³ (V_f = 42,5%). Canaletas 1, 2 e 3 do estojo. (4,5 MW).	127
TABELA 22 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2 -Al, com 3,1 gU/cm ³ (V_f = 27%). Canaletas 4 e 5 do estojo. (4,5 MW).	127

TABELA 23 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8-Al , com $3,2 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 45\%$). Canaletas 6, 7 e 8 do estojo. (4,5 MW).....	128
TABELA 24 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8-Al , com $2,3 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 33\%$). Canaletas 9 e 10 do estojo. (4,5 MW).....	128
TABELA 25 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al , com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 42,5\%$). Canaletas 1, 2 e 3 do estojo. (5 MW).....	129
TABELA 26 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al , com $3,1 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 27\%$). Canaletas 4 e 5 do estojo. (5 MW).....	129
TABELA 27 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8-Al , com $3,2 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 45\%$). Canaletas 6, 7 e 8 do estojo. (5 MW).	130
TABELA 28 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8-Al , com $2,3 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 33\%$). Canaletas 9 e 10 do estojo. (5 MW).....	130
TABELA 29 - Concentrações iniciais de ^{235}U nas miniplacas.....	131
TABELA 30 - Concentrações de ^{235}U homogeneizadas nas miniplacas.....	131
TABELA 31 - Estimativa da quantidade de ^{137}Cs e atividade das miniplacas combustíveis ao final dos períodos de queimas de 50% e 80% do ^{235}U inicial.....	137
TABELA 32 - Parâmetros de irradiação das miniplacas combustíveis para operação a potência de 4,0 MW (62horas/semana, 45 semanas/ano).	144
TABELA 33 - Tempo de irradiação das miniplacas combustíveis para operação a potência de 4,5 MW (62horas/semana, 45 semanas/ano).	145
TABELA 34 - Tempo de irradiação das miniplacas combustíveis para operação a potência de 5,0 MW (62horas/semana, 45 semanas/ano).	146
TABELA 35 - Tempo de irradiação das miniplacas combustíveis para operação a potência de 5,0 MW (120horas/semana, 45 semanas/ano).	147
TABELA 36 - Fluxos de nêutrons nas miniplacas de U_3Si_2-Al , com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (10^a , 9^a e 8^a canaletas do estojo). DIM na posição 36. Reator a 5,0 MW.	148
TABELA 37 - Fluxos de nêutrons nas miniplacas de U_3Si_2-Al , com $3,1 \text{ gU/cm}^3$ (7^a e 6^a canaletas do estojo). DIM na posição 36. Reator a 5,0 MW.	149
TABELA 38 - Fluxos de nêutrons nas miniplacas de U_3O_8-Al , com $3,2 \text{ gU/cm}^3$ (5^a , 4^a e 3^a canaletas do estojo). DIM na posição 36. Reator a 5,0 MW.	150
TABELA 39 - Fluxos de nêutrons nas miniplacas de U_3O_8-Al , com $2,3 \text{ gU/cm}^3$ (2^a e 1^a canaletas do estojo). DIM na posição 36. Reator a 5,0 MW.	151
TABELA 40 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3Si_2-Al , com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (10^a , 9^a e 8^a canaletas do estojo). DIM na posição 65. Reator a 5,0 MW.....	154
TABELA 41 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3Si_2-Al , com $3,1 \text{ gU/cm}^3$ (7^a e 6^a canaletas do estojo). DIM na posição 65. Reator a 5,0 MW.	155
TABELA 42 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3O_8-Al , com $3,2 \text{ gU/cm}^3$ (5^a , 4^a e 3^a canaletas do estojo). DIM na posição 65. Reator a 5,0 MW.....	156
TABELA 43 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3O_8-Al , com $2,3 \text{ gU/cm}^3$ (2^a e 1^a canaletas do estojo). DIM na posição 65. Reator a 5,0 MW.....	157
TABELA 44 - Parâmetros de irradiação das miniplacas na configuração 1 de montagem do DIM, para as potências de operação do IEA-R1 de 4, 4,5 e 5,0 MW.....	160
TABELA 45 – Limites termohidráulicos para o IEA-R1 (IPEN, 1998).	162
TABELA 46 – Parâmetros de utilização de alguns EC irradiados no IEA-R1 ^(A)	165

Lista de Figuras

FIGURA 1 - Representação de seções transversais de combustíveis a dispersão.	30
FIGURA 2 - Dados experimentais obtidos em PIE versus resultados de inchamento percentual das miniplacas de U_3O_8 -Al calculados pelo DART.	36
FIGURA 3 - Fechamento de poros presentes nas partículas combustíveis de U_3Si_2 -Al, de placas combustíveis contendo dispersões com fração volumétrica de combustível de 50% e porosidade inicial de 13%, em função da densidade de fissões.	37
FIGURA 4 - Dados experimentais de inchamento versus a densidade de fissões, comparados com valores calculados pelo programa DART.	38
FIGURA 5 - Dispositivo IRIS para testes de irradiação de placas combustíveis de tamanho integral.	54
FIGURA 6 - Principais ensaios não destrutivos e destrutivos para caracterização pós-irradiação de combustíveis tipo placa de MTR.	66
FIGURA 7 - Visualização de um blister em uma placa combustível de EC de MTR.	67
FIGURA 8 - Núcleo do reator IEA-R1, com destaque para o Efeito Cherenkov.	78
FIGURA 9 - Posições dos componentes na placa matriz do reator IEA-R1.	79
FIGURA 10 - Sistema de inspeção visual Cyberia, modelo LEO.	80
FIGURA 11 - Esquema de ligação dos equipamentos do sistema de inspeção visual.	80
FIGURA 12 - Inspeção visual de miniplaca irradiada, na piscina do IEA-R1.	81
FIGURA 13 - Planilha para inspeção visual de miniplaca combustível.	82
FIGURA 14 - Etapas do ensaio de sipping de miniplaca irradiada.	84
FIGURA 15 - Microestrutura típica de uma miniplaca combustível de U_3Si_2 -Al, (4,8 gU/cm^3), não-irradiada, produzida no IPEN/CNEN-SP.	86
FIGURA 16 - Radiografia de raios-X tirada de uma miniplaca combustível pronta.	86
FIGURA 17 - Dimensões da miniplaca combustível.	88
FIGURA 18 - Seção transversal do DIM.	89
FIGURA 19 - Vista geral dos componentes do DIM.	89
FIGURA 20 - Vista geral dos componentes do DIM.	90
FIGURA 21 - Posicionamentos das malhas (eixo z) nas miniplacas em relação à modelagem do núcleo com o CITATION.	92
FIGURA 22 - Temperaturas nas miniplacas do DIM em função da vazão, na posição 36.	95
FIGURA 23 - Sensor LVDT.	96
FIGURA 24 - Medição de espessura da miniplaca dummy com micrômetro.	99
FIGURA 25 - Medição de espessura da miniplaca dummy com micrômetro (vista lateral).	99
FIGURA 26 - Medição de espessura de miniplaca dummy com sensores do SMEMC.	99
FIGURA 27 - Medição de espessura de miniplaca dummy com sensores do SMEMC.	99
FIGURA 28 - Média das medidas na piscina do reator e os desvios padrão.	103
FIGURA 29 - Estrutura metálica do SMEMC apoiada no piso do saguão do IEA-R1 para a instalação dos sensores LVDT.	103
FIGURA 30 - Esquema de montagem dos equipamentos do SMEMC.	104
FIGURA 31 - Estrutura metálica instalada dentro da piscina.	104

FIGURA 32 - Equipamentos eletrônicos instalados na borda da piscina.....	104
FIGURA 33 - Vistas do rack suporte para o DIM e estojo das miniplacas.....	105
FIGURA 34 - Ferramenta para retirada do estojo do interior da caixa do DIM.....	106
FIGURA 35 - Ferramenta de manuseio de miniplaca.	106
FIGURA 36 – Posições para medição de espessuras na miniplaca.....	106
FIGURA 37 - Montagem do rack suporte para o DIM na plataforma submersa.	107
FIGURA 38 - Correlação da coloração do óxido sobre placa combustível com a espessura do óxido obtida em medida experimental durante PIE, (U_3Si_2-Al , $4,8\text{ gU/cm}^3$).	111
FIGURA 39 - Padrões de tonalidades de cor correlacionadas com as espessuras das camadas obtidas em medida experimental durante PIE em célula quente (placa combustível de U_3Si_2-Al , $4,8\text{ gU/cm}^3$, com revestimento $AlFeNi$ - liga de Al com 1% Fe , 1% Ni e 1% Mg).	111
FIGURA 40 - Fotografias da Miniplaca SIE02-4,8.....	115
FIGURA 41 – Croqui ilustrativo da montagem das miniplacas no DIM - Configuração 1.....	116
FIGURA 42 - (a) Carregamento das miniplacas no DIM para início da irradiação; (b) Vista do estojo montado no interior da caixa do DIM.....	116
FIGURA 43 - Configuração 246 do núcleo do IEA-R1.....	117
FIGURA 44 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na pos. 36, operação a 4,0 MW, 62 h/sem e 45 semanas/ano).....	132
FIGURA 45 - Duração irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U , (DIM na pos. 36, operação a 4,5 MW, 62 h/sem e 45 semanas/ano).....	132
FIGURA 46 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U , (DIM na pos. 36, operação a 5,0 MW, 62 h/sem e 45 semanas/ano).....	133
FIGURA 47 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U , (DIM na pos. 36, operação a 5,0 MW, 120 h/sem e 45 semanas/ano).....	133
FIGURA 48 - Esquema representativo dos períodos de irradiação das miniplacas.	134
FIGURA 49 – Croqui ilustrativo da montagem das miniplacas no DIM - Configuração 2.....	148
FIGURA 50 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na posição 36, operação a 5,0 MW, 62 horas/semana e 45 semanas/ano, remanejamento das miniplacas para a configuração 2).....	153
FIGURA 51 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na posição 36, operação a 5,0 MW, 120 horas/semana e 45 semanas/ano, remanejamento das miniplacas para a configuração 2).....	153
FIGURA 52 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na posição 65, operação a 5,0 MW, 62 horas/semana e 45 semanas/ano, disposição das miniplacas na configuração 2).	159
FIGURA 53 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na posição 36, operação a 5,0 MW, 120 horas/semana e 45 semanas/ano, disposição das miniplacas na configuração 2).	159

Lista de Abreviaturas e/ou Siglas

ANL	Laboratório Nacional de Argonne (EUA)
ANS	<i>American Nuclear Society</i> (EUA)
CCHEN	Comissão Chilena de Energia Nuclear
CEA	Commisariat à L'énergie Atomique (França)
CERCA	<i>Compagnie pour l'Etude et la Réalisation de Combustibles Atomiques</i> (França)
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica (Argentina)
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear (Brasil)
CRP	Programa de Pesquisa Coordenado
DIM	Dispositivo de irradiação de miniplacas
EC	Elemento combustível
ECC	Elemento combustível de controle
EDAX	Sistema para micro análise cristalográfica empregando "energia dispersiva por raios-X".
END	Ensaio não destrutivo
EPMA	<i>Electron probe micro-analyzer</i> (Micro-sonda eletrônica)
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> (Áustria)
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
<i>JHR</i>	<i>Jules Horowitz Reactor</i> (Reator Jules Horowitz)
<i>LVDT</i>	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MTR	<i>Material Testing Reactor</i> (Reator de Teste de Materiais)
<i>NFEC</i>	<i>Nuclear Fuel Element Center</i> (Batan, Indonésia)
<i>NRG</i>	Grupo de Consultoria e Pesquisa Nuclear
<i>ORNL</i>	<i>Oak Ridge National Laboratory</i> (USA)
PF	Produto de fissão
<i>PIE</i>	<i>Post Irradiation Examination</i> (Exame pós-irradiação)
PM	Placa Matriz
<i>RERTR</i>	<i>Reduced Enrichment for Research and Test Reactors Program</i>
<i>SEM</i>	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (Microscopia Eletrônica de Varredura)
SIVCI	Sistema de Inspeção Visual de Combustíveis Irrradiados
SMEMC	Sistema Medidor de Espessuras de Miniplacas Combustíveis
<i>TRIGA</i>	<i>Training, Research, Isotopes, General Atomics</i> (Reator de treinamento, pesquisa e produção de radioisótopos - General Atomics)
<i>USNRC</i>	Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos da América

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1990, o IPEN/CNEN-SP¹ tem produzido e qualificado os combustíveis nucleares utilizados nos seus reatores nucleares de pesquisas.

O termo "qualificação do combustível" tem sido empregado para designar o processo de demonstração de que um combustível nuclear, fabricado em conformidade com uma determinada especificação, apresenta bom desempenho sob irradiação, conforme presumido e descrito no seu licenciamento de segurança e, confiabilidade necessária para a operação econômica do reator (Crawford et al., 2007).

Processos tradicionalmente empregados no mundo para a qualificação de novos combustíveis para uso em reatores nucleares de pesquisas envolvem, geralmente, diversas atividades, desde as etapas de fabricação, irradiação de miniplacas e elementos combustíveis protótipos em reatores de alto fluxo neutrônico, até a realização de exames pós-irradiação, em células quentes especiais, para a caracterização do desempenho sob irradiação dos combustíveis e materiais estruturais envolvidos. Normalmente, amostras² de combustíveis são irradiadas até que sejam alcançadas queimas significativas do elemento físsil: (i) queima média normal de descarga para reator de pesquisa e teste (*MTR*) estipulada em 50% da quantidade inicial de ^{235}U e (ii) queimas de pico mais elevadas, da ordem de 80% do ^{235}U , para demonstrar a margem de segurança sobre a queima de descarga normal. Para os combustíveis de interesse deste trabalho, as dispersões de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ com $3,2 \text{ gU/cm}^3$ e $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com $4,8 \text{ gU/cm}^3$, essas queimas de pico equivalem a densidades de fissões de $2,8 \times 10^{21}$ e $4,6 \times 10^{21}$ fissões/cm³ do cerne, respectivamente. Reatores nucleares de pesquisas e testes, que operam com altos fluxos de nêutrons e ciclos de dezenas de dias ininterruptos de irradiação, possibilitam alcançar estas queimas em tempos relativamente curtos, da ordem de poucos meses (Leenaers et al., 2008; JRC, 2005).

¹ A sigla IPEN/CNEN-SP corresponde à denominação dada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, autarquia do Governo do Estado de São Paulo, vinculada à Secretaria de Desenvolvimento. É gerenciado técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear e associado para fins de ensino de pós-graduação à Universidade de São Paulo.

² O uso de miniplacas combustíveis para a determinação das propriedades básicas de irradiação requer menores quantidades de material combustível. Adicionalmente, as consequências da falha de uma miniplaca combustível para a operação do reator são baixas devido à pequena quantidade de combustível envolvida.

Análises destrutivas de combustíveis nucleares irradiados requerem o uso de células quentes com blindagens especiais, dispositivos de telemanipulação, equipamentos e técnicas especiais para análises microestruturais complexas de caracterização do material combustível ou dos materiais estruturais envolvidos. Análises não-destrutivas podem ser realizadas dentro da piscina de estocagem do reator ou mesmo no interior de células quentes (IAEA, 2009).

O Brasil não possui instalações de células quentes apropriadas para a realização de exames pós-irradiação (*Post Irradiation Examination* - PIE) de combustíveis nucleares. Há vários anos a Marinha do Brasil vem desenvolvendo um projeto de células quentes para serem utilizadas na caracterização de combustíveis dos seus reatores de propulsão naval. Entretanto, apesar dos esforços empreendidos, estas instalações não foram ainda concluídas.

1.1. Breve histórico

A fabricação e fornecimento de elementos combustíveis pelo IPEN/CNEN-SP ao seu reator de pesquisas, o IEA-R1, permitiu, em meados da década de 1990, a substituição gradativa dos elementos combustíveis (EC) de alto enriquecimento (HEU³) de origem americana e a conversão deste reator para o uso de combustíveis com baixo enriquecimento (LEU⁴). A Instituição fabricou e irradiou diretamente no núcleo do IEA-R1 EC contendo dispersões já internacionalmente testadas e qualificadas sob irradiação pelo programa RERTR⁵. Para ganhar experiência, empregou baixas frações volumétricas de combustível. Na fabricação dos primeiros EC do tipo LEU na Instituição foi usado o composto U₃O₈ disperso em matriz de Al, com enriquecimento de 19,95% em ²³⁵U e densidade de 1,9 gU/cm³ na dispersão.

Foram fabricados e irradiados dois EC parciais (identificados como IEA-128 e 129, com duas e oito placas combustíveis, respectivamente) e um EC protótipo⁶ completo (IEA-130) com 18 placas combustíveis, utilizando U₃O₈-Al com 1,9 gU/cm³. As queimas alcançadas pelos EC IEA-128, 129 e 130 foram, respectivamente 11,09%, 18,60% e

³ HEU: *High Enriched Uranium*. Urânio de alto enriquecimento (> 20% em átomos de ²³⁵U).

⁴ LEU: *Low Enriched Uranium*. Urânio de baixo enriquecimento (≤ 20% em átomos de ²³⁵U).

⁵ RERTR: *Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, programa lançado em 1978 pelo Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos da América, após decisão daquele país de restringir a exportação de urânio de alto enriquecimento (²³⁵U>20%) (CEA, 2008).

⁶ O termo *EC protótipo* refere-se ao primeiro EC completo fabricado, projetado para uso em um determinado reator de pesquisas, que contém um combustível não qualificado e no qual se pretende realizar testes de irradiação naquele reator, como parte do processo de qualificação do combustível (IAEA, 2009).

35,26% da quantidade inicial de ^{235}U . Como era esperado, esses combustíveis iniciais apresentaram bom comportamento sob irradiação, uma vez que com a baixa fração volumétrica de combustível (27%) na dispersão, o volume da matriz metálica de alumínio predominava nas mudanças de características do cerne durante a irradiação (Perrotta, 2002).

Dando continuidade ao desenvolvimento da fabricação de combustíveis a dispersão na Instituição, foi aumentada a densidade de urânio na dispersão de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ para $2,3 \text{ gU/cm}^3$ (fração volumétrica de combustível de 33% na dispersão) e também iniciada a fabricação e irradiação de EC com siliceto de urânio ($\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$) com densidade de $3,0 \text{ gU/cm}^3$ (fração volumétrica de combustível de 26,5% na dispersão). Foram adotadas especificações técnicas baseadas em publicações técnicas da IAEA– *International Atomic Energy Agency*, que resumiam a experiência internacional obtida nos testes de irradiação para qualificação desse combustível (IAEA, 1980 e 1986; Simões, 1993). Foram fabricados e carregados no núcleo do IEA-R1 dois EC protótipos completos (IEA- 168 e 169, com revestimentos de Al ASTM-1060 e ASTM-6061 T0, respectivamente). As boas condições gerais observadas desses EC protótipos durante as inspeções visuais deram sinal verde para a fabricação seriada de EC para o IEA-R1. Em 1997, todos os EC do núcleo desse reator já eram de fabricação IPEN/CNEN-SP. Os critérios adotados para a irradiação foram que cada EC novo deveria ser carregado inicialmente em posições periféricas do núcleo do IEA-R1 e que cada EC poderia permanecer no núcleo até que fosse igualada a sua queima com aquela alcançada pelo respectivo EC protótipo.

Durante os períodos de utilização e irradiação dos EC, o reator foi regularmente monitorado e inspecionado por meio de procedimentos e técnicas não-destrutivas, tais como: análises químicas da água, monitoração radiológica, ensaios de *sipping* (Perrotta, Terremoto e Zeituni, 1998; Zeituni et al., 2004), ensaios de varredura de raios-gama (Terremoto et al., 2000) e, ensaios de inspeção visual (Silva et al., 2000; Perrotta, 2002). Os três primeiros são úteis na detecção e investigação de falhas já ocorridas e orientam as tomadas de decisão subsequentes, de caráter *corretivo*. Os ensaios de varredura gama permitem a avaliação da queima do combustível nuclear. O ensaio visual permite a observação do estado geral e da integridade dos EC, contribuindo na tomada de decisões de caráter *preventivo*, visando evitar a ocorrência de falhas e suas consequências (Alencar, 2004).

Não ocorreu nenhum tipo de falha sistemática nos EC testados, estando os combustíveis produzidos no IPEN/CNEN-SP de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$, com concentrações de urânio de

1,9 e 2,3 g/cm³, e de U₃Si₂-Al, com 3,0 g/cm³ considerados qualificados para a geometria do EC e para as condições de uso no IEA-R1, até as queimas alcançadas pelos respectivos EC protótipos de, respectivamente, 36,10%, 40,50% e 43,58% dos átomos de ²³⁵U iniciais. Os combustíveis têm sido descarregados do reator exclusivamente devido à falta de reatividade do núcleo.

O principal objetivo do programa de qualificação dos combustíveis conduzido no IPEN/CNEN-SP foi qualificar os processos tecnológicos e as instalações desenvolvidas na Instituição para a fabricação de elementos combustíveis para o reator IEA-R1, usando os compostos de urânio U₃O₈ e U₃Si₂ (Silva et al., 2008, Durazzo et al., 2008).

Entretanto, permanecia no IPEN/CNEN-SP o interesse em fabricar e qualificar esses combustíveis em densidades de urânio mais elevadas, de forma a alcançar os valores já qualificados internacionalmente, de 3,2 gU/cm³ para o U₃O₈-Al e 4,8 gU/cm³ para o U₃Si₂-Al. Este interesse veio a ser reforçado com a previsão da construção, no País, do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), que deverá operar com potência superior a 25 MW, necessitando de combustíveis com maiores concentrações de urânio.

1.2. Objetivo da tese

O objetivo desta tese consistiu no estudo da aplicação de métodos não destrutivos na piscina do reator IEA-R1, visando a qualificação de combustíveis a dispersão de U₃O₈-Al e U₃Si₂-Al, de alta densidade de urânio, fabricados no IPEN/CNEN-SP.

As etapas para alcançar o objetivo proposto foram:

- a. Estudo dos fundamentos dos combustíveis a dispersão, das propriedades de irradiação do cerne e da placa combustível, como também das propriedades de irradiação do EC. Identificação dos fenômenos que ocorrem durante a irradiação e as principais propriedades que devem ser acompanhadas durante os testes de irradiação de combustíveis do tipo placa, para reatores de pesquisas e testes de materiais (MTR – *Material Testing Reactor*);
- b. Estudo das etapas e práticas correntes no mundo para desenvolvimento e qualificação de combustíveis para MTR, as principais técnicas de PIE e seus fundamentos;
- c. Aprimoramento dos métodos de ensaios não destrutivos de inspeção visual e *sipping*, disponíveis no IEA-R1. Implantação e implementação de infraestruturas para: (i) irradiação de miniplacas combustíveis, (ii) medição de espessura em

miniplacas combustíveis irradiadas e avaliação do inchamento da miniplaca ao longo dos ciclos sucessivos de irradiação, incluindo a criação de planilhas e procedimentos. Ressalta-se que a caracterização dimensional de miniplacas constitui uma técnica não destrutiva adicional em relação às utilizadas até então na Instituição, para a caracterização de EC irradiados na piscina do IEA-R1;

- d. Proposta de um plano para a aplicação de um conjunto de métodos não destrutivos na piscina do reator IEA-R1, para acompanhamento da irradiação das miniplacas combustíveis de testes.

1.3. Estrutura do trabalho

O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, que inclui um breve histórico do processo de desenvolvimento de combustíveis pelo IPEN/CNEN-SP, o objetivo da tese e, a descrição da estrutura do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre processos de qualificação de combustíveis a dispersão para uso em MTR, com ênfase nos métodos utilizados neste trabalho.

No capítulo 3 são apresentados um resumo da teoria e descrição dos métodos para qualificação de combustíveis, incluindo os fundamentos dos combustíveis nucleares para uso em reatores de pesquisas, descrição dos principais fenômenos que ocorrem no combustível nuclear durante irradiação, dos métodos para desenvolvimento e qualificação de combustíveis, das propriedades básicas e informações relevantes que são obtidas durante a fase de desenvolvimento da fabricação do combustível, bem como dos principais PIE empregados para caracterização do combustível nuclear irradiado. São descritas a experiência alcançada na qualificação de combustíveis pelo IPEN/CNEN-SP e as metodologias para cálculos empregadas no Centro de Engenharia Nuclear (CEN - IPEN/CNEN-SP).

No capítulo 4 são apresentadas a proposta da tese e a descrição da infraestrutura para caracterização de combustíveis irradiados por meio de métodos não destrutivos, sendo destacado o desenvolvimento de infraestrutura para irradiação de miniplacas e para medições subaquáticas de espessuras de miniplacas irradiadas. A proposta de medições periódicas de espessura das miniplacas para acompanhamento do inchamento das mesmas, em complementação a outros métodos não destrutivos (inspeção visual e *sipping*) já empregadas na Instituição, constitui-se em contribuição original deste trabalho.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos na caracterização inicial das miniplacas combustíveis, antes do carregamento das mesmas no núcleo e início da irradiação. São apresentados os resultados de cálculos de parâmetros neutrônicos nas posições das miniplacas, incluindo os fluxos de nêutrons, cálculo das taxas de fissões, densidade de fissões e estimativa dos tempos de irradiação das mesmas.

No capítulo 6 são discutidos os tempos de irradiação para alcançar as queimas pretendidas para a qualificação no IEA-R1 e alternativas para a diminuição dos mesmos. Em seguida, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1.4. Aspectos relevantes e originalidade

Foram realizados desenvolvimentos para aprimorar e adaptar os métodos não destrutivos empregados na Instituição para a caracterização, na piscina do reator IEA-R1, de miniplacas combustíveis irradiadas. Foram especificadas e fabricadas miniplacas combustíveis com dispersões de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al com alta concentração de urânio. Foi projetado e construído um dispositivo de irradiação com capacidade para irradiar até dez miniplacas combustíveis. No interior da piscina, foi finalizada a montagem e implantada infraestrutura básica para a realização de medições dimensionais de miniplacas irradiadas. Foram fabricados componentes e ferramentas para uso nos ensaios de medidas de espessuras das miniplacas irradiadas. Foram elaborados procedimentos para os ensaios de inspeção visual, *sipping* e de medidas de espessura das miniplacas, bem como para o cálculo do inchamento das mesmas.

Nos anos de 2009 a 2011 foram realizadas reuniões técnicas junto ao Comitê de Segurança do Reator de Pesquisas IEA-R1 e ao órgão licenciador (CNEN-RJ) para aprovação do programa experimental e licença para início da irradiação das miniplacas no IEA-R1.

As miniplacas combustíveis foram fabricadas no CCN (Centro do Combustível Nuclear) do IPEN/CNEN-SP. O carregamento das miniplacas no núcleo do IEA-R1 se deu em 29/05/2011. Antes do carregamento, foram obtidas medidas iniciais de espessuras das miniplacas, que serão consideradas nos cálculos de inchamento ao longo do período de irradiação. Foram realizados cálculos dos parâmetros neutrônicos como fluxos de nêutrons, taxas de reação de fissão e os tempos necessários para alcançar as queimas para qualificação dos combustíveis, levando em conta os parâmetros operacionais e configuração do núcleo do reator IEA-R1.

As dificuldades inerentes ao desenvolvimento da infraestrutura para medição de espessura de miniplacas irradiadas, na piscina do reator, devido às características e particularidades dos testes em ambiente radioativo e submerso, foram superadas com a utilização de dispositivos especiais e desenvolvimento de ferramentas específicas para manuseio remoto das miniplacas irradiadas.

Levando em conta os altos custos (da ordem de vários milhões de dólares americanos) associados aos serviços de irradiação para qualificação de combustíveis no exterior, considerou-se que a condução de um plano de irradiação de miniplacas no IEA-R1 empregando métodos não destrutivos, que possibilite o acompanhamento periódico do estado geral das mesmas ao longo do período de irradiação e avanços na compreensão e na capacidade de caracterização pós-irradiação dos combustíveis nacionais, representa uma contribuição inédita e importante para o processo de qualificação dos combustíveis produzidos no IPEN/CNEN-SP.

A realização de medições de espessura das miniplacas possibilitará a avaliação do inchamento do combustível após cada ciclo sucessivo de irradiação, constituindo-se em uma técnica não destrutiva adicional, disponibilizada recentemente no IEA-R1, para avaliação do desempenho sob irradiação de combustíveis na Instituição. Esta infraestrutura permitirá a obtenção de resultados inéditos no País, referentes às propriedades de irradiação e inchamento dos combustíveis de alta concentração de urânio produzidos na Instituição.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O início do desenvolvimento dos combustíveis do tipo dispersão deu-se em meados da década de 1950, no *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL, EUA), motivado pelas restrições impostas ao comércio e utilização de combustíveis de alto enriquecimento que eram utilizados nos reatores de pesquisa e teste de materiais (MTR) até então construídos. Toda a tecnologia e infra-estrutura existente na época estava voltada para a fabricação de combustíveis empregando ligas metálicas de U-Al, com urânio de alto enriquecimento (comumente empregados na época de 93% át. de ^{235}U) (Breazeale, 1952).

As modificações inicialmente efetuadas com o intuito de se diminuir o enriquecimento de urânio nas placas combustíveis do tipo U-Al consistiram em aumentar por um fator de cinco a quantidade de urânio em cada placa (conservando as demais variáveis de projeto). Desta forma, a reatividade do núcleo do reator não se alteraria devido à redução do enriquecimento (Waugh, 1959). Assim, as ligas de U-Al com alto enriquecimento, que vinham sendo utilizadas nas placas combustíveis com 10 a 20% em massa de urânio, passaram a ter entre 45 e 50% em massa deste material. No entanto, já nas etapas de fabricação, as placas combustíveis fabricadas com altas concentrações de urânio apresentaram problemas de fragilidade e de falta de homogeneidade da composição, tornando inviável a sua utilização. Visando contornar esse problema, os pesquisadores do ORNL iniciaram pesquisas de compostos com maiores massas específicas de U, de forma a reduzir a concentração em massa (e/ou volume) das placas fabricadas. Dentre os compostos de urânio investigados, o UAl_x , o U_3O_8 , o U_3Si_2 , o U_3Si e o U_6Fe apresentavam-se na época como os mais promissores a possíveis utilizações. No entanto, o U_3Si_2 tornou-se o mais atraente, devido apresentar massa específica elevada, uma vez que o $\text{U}_3\text{Si-Al}$ não se mostrou adequado⁷, pois apresentou desempenho sob irradiação

⁷ Exames pós-irradiação realizados em miniplacas contendo $\text{U}_3\text{Si-Al}$ com até $6,1 \text{ gU/cm}^3$, fabricadas pela ANL e CNEA e irradiadas até queimas de 84-96% de ^{235}U tinham dado bons resultados, mas mostraram que limites de queima deviam ser impostos para este combustível. Quatro placas combustíveis de tamanho integral e um EC completo, tamanho integral foram fabricados pela CERCA e irradiados no reator SILOE até queimas de 55% de ^{235}U . Entretanto, evidências de que o U_3Si tornava-se amorfo e não se recristalizava sob irradiação convenceram o programa RERTR que este material, como então desenvolvido, não podia ser usado com segurança em placas combustíveis além dos limites estabelecidos nas irradiações no SILOE.

insatisfatório (Snelgrove, 1987; Hofman e Ryu, 1989; Simões, 1993; Travelli, 1997). O U_3Si tem sido utilizado em varetas combustíveis, no reator de pesquisas HANARO, da Coreia do Sul.

Novas técnicas de fabricação tiveram que ser desenvolvidas, uma vez que era impossível combinar os novos materiais em uma liga. Assim, surgiram os combustíveis a dispersão, fabricados pela técnica da metalurgia do pó (Tissier, 1991; Perrotta, 2002).

Na década de 1970, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) realizou trabalho investigativo da possibilidade da utilização da energia nuclear para fins pacíficos com simultânea minimização do risco de proliferação de armas nucleares. A partir disso, concluiu-se que o risco de proliferação de armas poderia ser diminuído com a conversão dos núcleos de reatores de pesquisas MTR contendo combustíveis HEU para LEU. A utilização de dispersões de compostos contendo alta densidade de urânio (UAl_x , U_3O_8 , U_3Si_2 e U_3Si) em matriz de Al foi a solução encontrada para substituir as ligas metálicas de U-Al de alto enriquecimento que eram utilizadas até então nos reatores MTR (Nazaré, 1984).

Em agosto de 1978, em resposta à crescente preocupação do Congresso dos EUA e do público sobre o potencial desvio de urânio altamente enriquecido para uso em armas nucleares, o Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos da América lançou o programa "*Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*" - RERTR. O objetivo principal desse programa tem sido desenvolver a tecnologia necessária para minimizar e eventualmente eliminar a utilização de urânio altamente enriquecido para a maioria das aplicações civis em todo o mundo (Wachs, 2007).

Em novembro de 1978, por ocasião do primeiro encontro internacional do RERTR, realizado no *Argonne National Laboratory – ANL (EUA)*, um grupo de cientistas, gestores, desenvolvedores de combustíveis e fabricantes se reuniram com a tarefa de encontrar soluções técnicas que possibilitassem a utilização de combustíveis LEU nos reatores de pesquisa que até então operavam com combustíveis HEU. Entretanto, pouco se sabia sobre os novos combustíveis que precisavam ser desenvolvidos, sobre o desempenho e as características de segurança resultantes da utilização dos novos combustíveis e, até mesmo, sobre os reatores para os quais os novos combustíveis estavam para ser desenvolvidos. Uma vez que para a maioria dos casos não era possível aumentar o carregamento de combustível no reator, tornou-se necessário encontrar compostos com maiores densidades de urânio para compensar o decréscimo no enriquecimento de urânio (Finlay, Hofman e Snelgrove, 2004). O desenvolvimento dos novos combustíveis deveria

evitar, quando possível, alterações no projeto do reator e nos processos de fabricação dos elementos combustíveis até então normalmente utilizados (Travelli, 1997).

Newton (1978) apresentou descrição das atividades de desenvolvimento de combustíveis a dispersão, de baixo enriquecimento, no *Idaho National Engineering Laboratory* (INEL). Foram descritos os exames e análises pós-irradiação realizados pelo INEL em placas combustíveis irradiadas no reator ORR (*Oak Ridge Research Reactor*), que incluíam: i) Medida da densidade para determinação do inchamento (*swelling*), incluindo o aumento de vazios; ii) Varredura de raios-gama para determinar os possíveis efeitos de picos de fluxo devido à distribuição não-uniforme do urânio; iii) Testes de empolamento para determinar a temperatura limite no qual os gases produtos de fissão começam a coalescer (interligar-se com a formação de bolhas maiores); iv) Usinagem gradual do revestimento para determinar a extensão da penetração de urânio no revestimento, em particular nas zonas mais finas; v) Exames metalográficos para determinar a penetração do combustível no revestimento.

Esforços, em nível mundial, foram incentivados nas últimas décadas pelo programa RERTR, no sentido de aumentar as densidades de urânio dos combustíveis existentes até os seus limites práticos de fabricação utilizando urânio de baixo enriquecimento ($<20\%$ de ^{235}U), bem como para desenvolver e qualificar novos compostos combustíveis, com maiores densidades de urânio, que permitam a conversão de alguns reatores de pesquisas e testes projetados para fornecer altos fluxos de nêutrons, que ainda necessitam de combustíveis HEU. Maior ênfase foi dada para o desenvolvimento de combustíveis para os reatores de pesquisas, com EC do tipo placa, uma vez que estes eram os maiores usuários de urânio com alto enriquecimento (ANL, 2010).

Os combustíveis de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, que são os de interesse para esse trabalho, tiveram seus primeiros testes de irradiação conduzidos pelo RERTR no reator de pesquisas ORR (ANL) durante o biênio 1981-82. Foram irradiadas miniplacas fabricadas pelo RERTR com dispersões de U_3Si , U_3SiAl e U_3Si_2 em matriz de Al, como também miniplacas de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ fabricadas pela CNEA. Uma vez que o U_3Si é mais denso que o U_3Si_2 , o cerne combustível com $\text{U}_3\text{Si-Al}$ contém uma maior densidade de urânio do que aquele com $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, para uma mesma fração em volume da fase dispersa. Miniplacas combustíveis com $\text{U}_3\text{Si-Al}$, com até $6,1 \text{ gU/cm}^3$ foram fabricadas pelo ANL e pela CNEA (IAEA, 2009). Os resultados dos testes de irradiação das miniplacas foram transmitidos a fabricantes de combustíveis tipo placa como a CERCA na França, NUKEM na Alemanha e *Atomics Internacional* nos EUA, que começaram a fabricar e a testar placas combustíveis

full size com os materiais testados no ORR assim como a produzir e irradiar miniplacas para testar outros materiais mais promissores. O resultado do esforço inicial foi a demonstração bem sucedida de combustíveis LEU dispersos em matriz de alumínio, com concentrações de urânio de até 2,3 gU/cm³ para UAl_x-Al, 3,2 gU/cm³ para o U₃O₈ e 3,7 g/cm³ para UZrH_x. Em dezembro de 1981, o reator de pesquisas *Ford Nuclear Reactor* (FNR), localizado na Universidade de Michigan-USA, tornou-se o primeiro reator convertido pelo programa RERTR, utilizando um combustível de dispersão da liga UAl_x em matriz de Al, LEU, com uma densidade de 1,7 g/cm³ (Wachs, 2007).

O desenvolvimento da fabricação dos combustíveis a dispersão de siliceto de urânio no ANL incluiu a criação de um método para produzir o pó de U₃Si₂ a partir da redução do U₃Si e U₃SiAl. Até meados de 1981, haviam sido desenvolvidos os métodos de laminação e fabricação dos combustíveis a dispersão baseados na técnica clássica de quadro-moldura (*picture-frame*), sendo que 31 miniplacas com frações em volume de combustível variando de 31 a 44% foram fabricadas para os testes de irradiação (Domagala et al., 1983; IAEA, 2009).

A AIEA iniciou em 1983 um Programa de Pesquisa Coordenado (CRP) intitulado “*Examination and Documentation Methodology for Water Reactor Fuel (ED-WARF)*”, que teve dois objetivos principais: (1) identificar e documentar um conjunto de procedimentos como principais técnicas de medidas para exames de combustíveis e, (2) desenvolver e recomendar metodologia comum para a documentação das informações relevantes obtidas nos testes pré-irradiação (*out of pile*) e, dos dados pós-irradiação obtidos ao longo do histórico de irradiação. Os trabalhos envolvendo diversos países participantes culminaram na preparação do *Guidebook on Non-Destructive Examination of Water Reactor Fuel* – TRS-322 (IAEA, 1991).

Em 1987, no Encontro Internacional do *RERTR* realizado na cidade de Buenos Aires, Argentina, foram apresentados trabalhos que deram como qualificados e licenciáveis para uso em reatores de pesquisa, entre outros, as dispersões de UAl_x-Al, U₃O₈-Al e o U₃Si₂-Al com densidades, respectivamente, de até 2,3 gU/cm³ (45% em volume de UAl_x), 3,2 gU/cm³ (45% em volume de U₃O₈) e 4,8 gU/cm³ (42,5% em volume de U₃Si₂), devido ao bom desempenho sob irradiação apresentado pelas mesmas nos testes de irradiação realizados (Snelgrove, 1987; Matos, 1996; ANL, 2010; IAEA, 2009).

Em 1988, foi publicado pela AIEA um documento técnico (IAEA-TECDOC-467)⁸ contendo um guia para a padronização de especificações e procedimentos de inspeção para combustíveis do tipo placa, de baixo enriquecimento, para reatores de pesquisas MTR (IAEA, 1988).

Ainda no ano de 1988, a Comissão Reguladora Nuclear dos EUA (USNRC) emitiu a aprovação formal⁹ para a utilização do combustível U_3Si_2-Al com até $4,8 \text{ gU/cm}^3$ em reatores de pesquisa e teste norte-americanos. A demonstração bem sucedida utilizando este combustível em um núcleo completo foi realizada no ORR, em 1987. Testes adicionais utilizando o U_3Si_2-Al foram concluídos em reatores de pesquisas ao redor do mundo (Travelli, 1997). No entanto, mesmo a quantidade de urânio presente no U_3Si_2-Al com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ não foi suficiente para viabilizar a conversão de alguns reatores MTR, de alto desempenho, que ainda necessitam do uso de combustíveis HEU para funcionamento, sendo aguardada a qualificação dos combustíveis baseados em ligas de urânio-molibdênio (Snelgrove, et al., 1997) que permita o uso de combustível LEU.

Simões, em 1993, realizou estudos relativos ao desempenho sob irradiação dos combustíveis a dispersão U_3O_8-Al , $UA1_x-Al$ e U_3Si_2-Al utilizados em MTR. Foram abordados os aspectos do desempenho sob irradiação, aliados a aspectos térmicos e termohidráulicos, para desenvolver uma metodologia de projeto para aplicação aos diferentes combustíveis dentro de critérios e limites de projeto estabelecidos para MTR.

Em 1994, foram apresentados resultados dos exames pós-irradiação do primeiro EC LEU de U_3Si_2-Al (com $3,2 \text{ gU/cm}^3$) produzido no *Nuclear Fuel Element Center - NFEC*, do Instituto BATAN, Indonésia, irradiado até uma queima de pico de ^{235}U de 62%. Segundo os pesquisadores envolvidos, os resultados mostraram comportamento sob irradiação similar a outros combustíveis tipo placa com U_3Si_2-Al produzidos e testados em outras Instituições. O principal efeito da irradiação sobre as placas combustíveis verificado foi o aumento na espessura de 30 a 40 μm (2,5 - 3,0%). Concluiu-se que este aumento da espessura foi quase inteiramente devido à formação de uma camada de corrosão (*boehmita*). A contribuição do inchamento do combustível no aumento da espessura foi relativamente pequena (menos de 10 μm), compatível com a queima do combustível e com a relativamente moderada fração em volume inicial do combustível

⁸ IAEA-TECDOC-467 - *Standardization of Specifications and Inspection Procedures for LEU Plate-Type Research Reactor Fuel*. (IAEA, 1988)

⁹ U.S. Nuclear Regulatory Commission Report "Safety Evaluation Report Related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide-Aluminum Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors" NUREG-1313 (July 1988).

(27%) no cerne combustível. Adicionalmente, foram apresentados valores de espessura de camada de óxido medidos para o mesmo material (AlMg_2) irradiado no reator ORR, como também, valores calculados usando uma correlação desenvolvida no ORNL (Suripto et al., 1994).

Ruggirello et al. (1998) apresentaram os estágios percorridos e as atividades planejadas do programa para a qualificação da CNEA (Comissão Nacional de Energia Atômica, Argentina) como um fornecedor de combustíveis de baixo enriquecimento de urânio (de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, para reatores de pesquisas). Foram descritos os experimentos de irradiação e planejamento das atividades de exames pós-irradiação de um EC (P04) protótipo irradiado, bem como o panorama das instalações para PIE e equipamentos. O programa foi descrito dividido em várias etapas, incluindo: (i) desenvolvimento do processo de obtenção do material físsil siliceto de urânio, (ii) irradiação e PIE de miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, (iii) irradiação e PIE de vários protótipos com tamanho integral. Foram citadas aplicações de importantes investimentos em instalações para produção de elementos combustíveis e instalações para PIE (Ruggirello et al., 1998).

Em 1999, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) lançou as diretrizes¹⁰ para a qualificação de pessoal e certificação para a realização de ensaios não destrutivos em itens de instalações nucleares (CNEN, 1999).

Em 2001, A Comissão Chilena de Energia Nuclear (CCHEN) assinou um contrato com a IAEA e o Grupo de Consultoria e Pesquisa Nuclear (NRG), referente aos serviços de irradiação e exames pós-irradiação para a qualificação dos combustíveis fabricados no Chile. A irradiação de um EC feito com $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, com $3,4 \text{ gU/cm}^3$, foi conduzida no reator HFR, Petten, Holanda, de Maio de 2003 a Novembro de 2004, tendo o EC alcançado queimas superiores a 65% de ^{235}U . Os exames pós-irradiação foram realizados no período de setembro a outubro de 2005. Tendo o EC apresentado o desempenho esperado, a qualificação foi concluída com êxito (Klein, 2006). Em 2007, a CCHEN iniciou a irradiação no reator RECH-1, de um EC protótipo contendo $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, com $4,8 \text{ gU/cm}^3$. O programa de acompanhamento inclui: testes de *sipping*, inspeção visual, medidas de queima, medidas do fluxo de nêutrons, medidas das folgas (*gaps*) nos canais de refrigeração, análises da qualidade da água (Torres et al., 2010).

¹⁰ Norma CNEN-NN-1.17 (CNEN, 1999).

Ruggirello et al. (2002) apresentaram descrição dos exames pós-irradiação do primeiro elemento combustível protótipo (P-04) fabricado e irradiado na Argentina, atividades que fizeram parte do programa de qualificação da CNEA como um fornecedor de elementos combustíveis para reatores de pesquisa contendo dispersões de U_3Si_2-Al . O principal propósito das atividades foi estabelecer as várias técnicas padrão para PIE em célula quente, considerando os passos seguintes do programa de qualificação, assim como ganhar experiência no desempenho deste material nuclear e sobre o controle dos processos de fabricação. Após um período de decaimento apropriado, o P-04 foi transportado para a célula quente no Centro Atômico de Ezeiza. Testes não destrutivos e destrutivos foram realizados seguindo procedimentos de PIE desenvolvidos no Laboratório Nacional de Argonne (ANL- EUA), incluindo medidas dimensionais, observações microestruturais e análises químicas para determinação da queima. Os autores descreveram a metodologia e resultados obtidos.

Sindelar et al.,(2002) elaboraram documento estabelecendo critérios para categorização de danos em combustíveis irradiados armazenados em piscinas de estocagem de reatores de pesquisas. Descreveram que a experiência internacional tem mostrado que imagens de vídeo obtidas em inspeções visuais na piscina, entre os ciclos de irradiação, ou mesmo periodicamente ao longo do período de armazenamento de EC queimados, podem proporcionar informações sobre a condição estrutural geral do EC ou mesmo do tipo de dano no combustível, além de estimativa da porção danificada do revestimento ou do cerne combustível exposto.

Alencar (2004), apresentou uma metodologia para avaliação não destrutiva subaquática de integridade de revestimentos de combustíveis de reatores nucleares de pesquisa e teste de materiais (dos tipos vareta cilíndrica e placa combustível) instalados respectivamente nos reatores IPR-RI (TRIGA) e IEA-RI (MTR), utilizando o ensaio eletromagnético de correntes parasitas. Fizeram parte da metodologia o desenvolvimento de padrões de referência para calibração específicos para cada tipo de combustível, o desenvolvimento de sondas de teste específicas para cada tipo de combustível, as recomendações para a calibração do sistema de ensaio, a obtenção de curvas de avaliação por amplitude de tensão e os procedimentos utilizáveis para a avaliação das discontinuidades detectadas. Foi discutida a aplicação da técnica de correntes parasitas para a medida submersa de camada de óxidos sobre placas combustíveis de MTR.

Também em 2004, Sacristan e colaboradores apresentaram artigo descrevendo aspectos do processo de qualificação de placas combustíveis MTR, durante condução de

experimentos de irradiação de placas combustíveis com tamanho integral no reator OSIRIS, com utilização do dispositivo de irradiação IRIS. Esse dispositivo de irradiação permite a remoção das placas combustíveis durante os períodos de desligamento do reator para a realização de medidas de espessura para determinação do inchamento. Os pesquisadores apresentam descrições dos dispositivos de irradiação IRIS, de medidas de inchamento e de espectrometria gama empregadas. Medidas de perfil de fluxo de nêutrons foram obtidos no reator ISIS utilizando folhas de ouro montadas sobre lâminas de Plexiglas, que foram inseridas enquanto o reator ISIS estava desligado, no meio do canal de água entre as placas combustíveis de testes. O trabalho dos pesquisadores discute também os programas computacionais para simulação e realização dos cálculos termohidráulicos como também descreve os principais exames pós-irradiação realizados nas instalações da CEA – Cadarache (Sacristan et al., 2004).

Ainda em 2004, Zeituni e colaboradores descreveram os testes de *sipping* realizados em EC MTR do núcleo do reator de pesquisas IEA-R1, para encontrar qual deles havia falhado durante uma operação de rotina do reator. Isótopos radioativos de iodo (^{131}I e ^{133}I), empregados como monitores de falha, foram detectados em amostras correspondentes ao EC falhado. A atividade específica de cada amostra, bem como a taxa de vazamento média, foram medidas para o ^{137}Cs . Os combustíveis nucleares a dispersão $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e liga U-Al foram comparados com relação à taxas médias de vazamento de ^{137}Cs (Zeituni et al., 2004).

Em 2007, Crawford et al. apresentaram uma abordagem para o desenvolvimento e qualificação de combustíveis, visando sugerir uma estrutura lógica para melhor entendimento das atividades associadas ao planejamento de um programa de desenvolvimento de combustível. A abordagem baseou-se na experiência e observação de desenvolvimento e melhoria de combustíveis em vários estágios de maturidade tecnológica e atribui quatro fases ao processo de desenvolvimento e qualificação, a saber: (i) seleção de um combustível conceitual de referência; (ii) avaliação e melhoria do combustível para atendimento às especificações requeridas para o projeto de referência; (iii) obtenção de dados para dar suporte às avaliações de segurança e ao licenciamento do combustível e (iv) qualificação final do combustível para uma aplicação específica. Descrevem também que, para um programa de desenvolvimento de combustível, devido ao longo tempo exigido desde a seleção do projeto conceitual, desenvolvimento das tecnologias de fabricação,

irradiação, exames e análises pós-irradiação, o tempo dispendido até o licenciamento do mesmo pode durar mais de 20 anos (Crawford et al., 2007).

Silva et. al. (2008) apresentaram descrição do programa para qualificação dos combustíveis a dispersão de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al fabricados no IPEN/CNEN-SP, tendo sido descritas a experiência alcançada na irradiação de elementos combustíveis no IEA-R1 e algumas das técnicas não-destrutivas para aplicação na piscina do reator, disponíveis na Instituição.

Em 2009, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2009) publicou um documento que apresenta uma abordagem abrangente e um encadeamento lógico do processo de qualificação de novos combustíveis LEU para reatores de pesquisas, incluindo os fundamentos e um resumo das melhores práticas empregadas no mundo por países que possuem tecnologia de desenvolvimento, produção e fornecimento internacional de combustíveis, como Argentina, Canadá, França, República da Coreia e Estados Unidos da América. O documento fornece pontos de referência para os tipos, qualidade e completeza de informações geradas durante o processo de qualificação de um novo combustível, de maneira a garantir desempenhos aceitáveis dos mesmos para uso em reatores de pesquisas, apresentando abordagens para as fases do desenvolvimento e da qualificação sob-irradiação.

Em 2010, Domingos (2010) desenvolveu cálculos neutrônicos, termo-hidráulicos e de segurança para avaliar a segurança operacional da montagem do dispositivo de irradiação de miniplacas (DIM) no núcleo do reator IEA-R1. Foram feitas análises da reatividade inserida pela colocação do DIM em diferentes posições periféricas da placa matriz do IEA-R1 e das temperaturas nas miniplacas combustíveis após o esvaziamento da piscina em simulação de caso de um Acidente de Perda de Refrigerante (APR) do reator. Foi demonstrado que a reatividade inserida pela colocação do DIM é pequena e inferior ao máximo admitido por experimentos (< 1000 pcm) e que, em relação ao APR, a refrigeração do DIM poderá ser feita apenas pelo ar na piscina. Os cálculos demonstraram que a irradiação deverá ocorrer sem consequências adversas no núcleo do reator IEA-R1.

3. RESUMO DA TEORIA E DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE QUALIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES PARA MTR

3.1. Considerações sobre os combustíveis nucleares para MTR

Reatores nucleares de pesquisa e teste de materiais, denominados MTR (*Material Testing Reactor*), vêm sendo construídos e instalados em todo o mundo, desde a década de 1950. De um modo geral, os combustíveis utilizados nestes reatores são constituídos por um cerne (núcleo), composto por materiais fisséis e férteis, onde ocorrem as reações nucleares. Para garantir sua integridade e estabilidade estrutural, estes combustíveis possuem um revestimento (*cladding*), constituído geralmente por uma liga de alumínio ou aço inoxidável.

A maioria dos reatores de pesquisa e testes de materiais em operação utiliza ^{235}U como material fissil. Os compostos de urânio são geralmente utilizados na forma de óxidos, hidretos ou silicetos dispersos numa matriz de pó de alumínio. Em termos de enriquecimento, os mais frequentes são valores menores que 20% de ^{235}U , mas ainda existem reatores que necessitam de combustíveis com altos enriquecimentos, de até 93% de ^{235}U .

Atualmente, o maior uso de combustíveis com menores enriquecimentos tem sido devido a iniciativas de programas como o INFCE (*International Nuclear Fuel Cycle Evaluation*), da AIEA ou o RERTR (*Reduced Enrichment of Research and Test Reactors*), do US-DOE¹¹. Estes programas buscaram desenvolver as tecnologias de fabricação de novos combustíveis com maiores densidades de urânio, para substituir os combustíveis de ligas de U-Al inicialmente empregados com altos enriquecimentos (~ 93%), para valores menores que 20% (*Low Enrichment Uranium - LEU*) (IAEA, 1980), bem como qualificá-los. Tais iniciativas, essencialmente, visaram o direcionamento do uso da energia nuclear para fins pacíficos.

A TAB. 1 apresenta alguns dos compostos de urânio utilizados como combustível nuclear, com suas respectivas densidades. Os componentes não-fisséis destes compostos apresentam propriedades neutrônicas aceitáveis e a fabricação do pó do

¹¹ Departamento de Energia dos Estados Unidos da América.

combustível possui tecnologia relativamente simples devido suas características de fragilidade (Finlay, Hofman e Snelgrove, 2004).

TABELA 1 - Densidades de alguns compostos de urânio utilizados como combustível nuclear.

Composto	Al	UAl ₄	UAl ₃	UAl ₂	U ₃ O ₈	USi	U ₃ Si ₂	U ₃ Si	U ₆ Fe	U
Densidade (g/cm ³)	2,7	5,7	6,8	8,1	8,3	11,0	12,2	15,3	17,4	19,1

Fonte: Finlay, Hofman e Snelgrove (2004)

O material combustível é introduzido no reator nuclear no interior de dispositivos denominados *elementos combustíveis*. Neste ponto, torna-se importante citar que diversos autores estrangeiros e referências (Housner e Schumar, 1959; Snelgrove et al., 1987a, 1997; IAEA, 2009) empregam, no idioma inglês, as denominações de: (i) *fuel element (FE)* para designar qualquer dispositivo que contém material fissil separado da água do reator por meio de um revestimento, possível de ser irradiado e, (ii) *fuel assembly (FA)* para designar qualquer dispositivo constituído por um arranjo de *fuel elements (FE)*, configurado como um único componente possível de ser manipulado e irradiado. Neste trabalho o termo “elemento combustível (EC)” de reator de pesquisa se refere ao conjunto constituído por um arranjo de placas combustíveis de MTR ou mesmo a uma vareta combustível, que contém material combustível e que pode ser manuseado como um componente único, para ser colocado no núcleo do reator, para irradiação. Cada placa ou vareta combustível contém o material fissionável separado do refrigerante do reator por meio de um revestimento metálico apropriado.

O arranjo mecânico do EC depende do tipo de reator e sua aplicação. Existem diversos tipos de EC para reatores de pesquisas no mundo, sendo que os mais comuns são os do tipo placa, usados em reatores MTR e do tipo vareta, empregados em reatores TRIGA¹², entre outros. O enfoque deste trabalho de tese é direcionado aos combustíveis do tipo placa empregados no reator IEA-R1 instalado no IPEN/CNEN-SP.

3.1.1. Fundamentos dos combustíveis a dispersão

Combustíveis tipo dispersão consistem da mistura da fase que contém o isótopo fissil e do material da matriz metálica não fissil. Esses combustíveis são

¹² O reator TRIGA é uma classe de reatores nucleares de pequeno porte projetado e fabricado pela empresa General Atomics, dos EUA. TRIGA é uma sigla para "Training, Research, Isotopes, General Atomics" (Treinamento, Pesquisa, Isótopos, General Atomics). Um total de 70 reatores TRIGA foram instalados no mundo, sendo que existe um em operação (denominado IPR-R1) no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN-MG), em Belo Horizonte, MG, Brasil.

geralmente preparados pela técnica de metalurgia do pó, onde os pós do material fissil e do material da matriz são misturados, compactados, sinterizados e laminados para formar um material combustível contínuo. A técnica de dispersão oferece as seguintes vantagens quando a matriz (dispersante) predomina em volume:

- 1) Os danos no material combustível devido aos fragmentos de fissão são localizados próximos a cada partícula combustível e à região imediatamente em volta das mesmas;
- 2) O potencial para reação entre o combustível e o refrigerante é essencialmente eliminado em caso de ruptura do revestimento. Somente as partículas localizadas na superfície do cerne combustível podem ser expostas ao refrigerante;
- 3) O caminho para o fluxo de calor gerado nas partículas fisséis é através de um meio metálico não fissil altamente condutor, o que reduz as temperaturas de operação do combustível.

Uma representação do combustível a dispersão do tipo *cermet* (composto cerâmico de U disperso numa matriz metálica) é mostrado na FIG. 1. Nessa figura, as partículas dispersas são assumidas como esferas em um reticulado cúbico fechado e dois tamanhos de partículas são representados, com a zona esférica da matriz metálica danificada em torno de cada partícula.

FIGURA 1 - Representação de seções transversais de combustíveis a dispersão.
(Ippolito Jr, 1990; Perrotta, 2002)

Na FIG. 1(a) é representado um combustível do tipo *cermet* impropriamente projetado, onde as zonas danificadas por efeito da radiação na matriz ao redor das

partículas combustíveis estão sobrepostas. Na FIG. 1(b), por sua vez, encontra-se representado um *cermet* projetado de maneira adequada, no qual as zonas danificadas das partículas não estão sobrepostas, garantindo a continuidade da matriz e a separação física das partículas combustíveis. O combustível da FIG. 1(b) é mais resistente ao inchamento que o combustível da FIG. 1(a), devido à sua rede contínua de material não danificado da matriz. Para minimizar os danos da radiação (e efeitos da irradiação) e prover resistência mecânica e ductilidade, a matriz metálica do combustível a dispersão deve predominar no volume formando uma matriz contínua envolvendo a fase fissil. (Ippolito Jr, 1990; Perrotta, 2002).

Os combustíveis a dispersão são fabricados através da técnica da metalurgia do pó. Nesta técnica, o composto combustível, em forma de pó, é misturado a um material estrutural (geralmente o alumínio) também na forma de pó, até se obter uma mistura homogênea dos pós. Uma quantidade dessa mistura de pós é prensada e colocada em um forno para degaseificação, sendo obtido um bloco compactado, denominado *briquete*. O briquete é envolvido lateralmente por uma moldura de liga de alumínio. A moldura e o briquete são cobertos em suas faces por placas de liga de alumínio, formando uma espécie de *sanduíche*. Esse conjunto é laminado a quente, com diversos passes e aquecimentos intercalados, sendo que o último passo de laminação é dado a frio, para se chegar na espessura e resistência mecânica necessárias à placa. Esta técnica de fabricação da placa combustível é denominada de *picture-frame* (quadro-moldura). Com a mesma, podem ser obtidas, além de uma distribuição homogênea da fase fissil dispersa, concentrações que não comprometam as etapas de fabricação subsequentes. Entretanto, para garantir a integridade mecânica das placas, a concentração da fase dispersa é limitada em 45% em volume (Tissier, 1991).

As dispersões podem, no entanto, ter dificuldades de manter a uniformidade de propriedades físicas, mecânicas e térmicas durante irradiação no reator (para altas queimas), particularmente a resistência mecânica, ductilidade, resistência à corrosão e estabilidade sob irradiação. Para se alcançar os objetivos desejados de bom desempenho num combustível do tipo dispersão, os seguintes itens devem ser observados (Perrotta, 2002):

- ✓ O tamanho da partícula dispersa (fase fissil) deve ser grande comparado ao percurso médio de um fragmento de fissão;
- ✓ A distribuição das partículas dispersas na matriz deve ser a mais uniforme possível;

- ✓ A densidade do material da fase dispersa (físsil) deve ser alta;
- ✓ A fase contínua da matriz de metal deve ter o máximo de volume possível na dispersão.

Durante a irradiação, os danos mais intensos na partícula combustível e região adjacente a esta são produzidos pelos produtos de fissão sólidos e gasosos, que por serem pesados (quando comparados com os elétrons, prótons e nêutrons) possuem um alcance relativamente curto, ficando restritos a esta região. Na matriz (na região adjacente às partículas combustíveis), os danos mais intensos são causados pelos fragmentos de fissão. Os nêutrons também causam danos à matriz, só que estes danos só são preponderantes fora da zona afetada pelos fragmentos de fissão. Já no revestimento, os danos mais importantes são causados pelos nêutrons (principalmente os rápidos) e pela radiação gama de fissão (que possuem um alcance relativamente grande). Os nêutrons, que são emitidos com uma energia muito alta, ao incidirem em um material metálico colidem com vários átomos da rede, deslocando-os de suas posições originais, provocando mudanças nas propriedades mecânicas do revestimento (Simões, 1993).

O alumínio possui vantagem de ter baixa seção de choque de absorção de nêutrons, mas possui restrições em relação à faixa de temperatura que pode ser utilizado (baixo ponto de fusão, de 660 °C). Este material tem sido largamente utilizado como material de revestimento e de matriz metálica para combustíveis a dispersão empregados em reatores de pesquisa tipo MTR, onde podem ser obtidos altos fluxos de nêutrons ($> 10^{14}$ n/cm².s) a temperaturas relativamente baixas (< 150 °C).

3.1.2. Combustíveis a dispersão empregados no IPEN/CNEN-SP

O IPEN/CNEN-SP tem empregado dispersões de U₃O₈ e U₃Si₂ em matriz de Al com concentrações de urânio de 2,3 e 3,0 g/cm³, respectivamente. Estas concentrações de urânio são baixas se comparadas àquelas que são utilizadas no mundo, para esses mesmos compostos combustíveis.

As dispersões de U₃O₈ e U₃Si₂ em Al encontram-se qualificadas pelo RERTR para uso em reatores de pesquisas até as concentrações de 3,2 gU/cm³ e 4,8 gU/cm³, respectivamente (Travelli, 1997; ANL, 2010). Estes combustíveis têm demonstrado excelente desempenho sob irradiação (Hofman e Neimark, 1984) e êxito na operação de muitos reatores de pesquisa e teste de materiais no mundo, indicando que os combustíveis a dispersão alcançaram maturidade tecnológica (ARPANSA, 2004).

O U_3O_8 -Al tem sido utilizado, por exemplo, no reator egípcio ETRR-2, com densidade de $3,0 \text{ gU/cm}^3$ (IAEA, 2010b). Testes de irradiação desta dispersão com densidades de urânio mais altas, de até $4,2 \text{ gU/cm}^3$, foram conduzidos com bom desempenho (Elseaidy e Ghoneim, 2010).

Dispersões de U_3Si_2 -Al com concentrações de até $4,8 \text{ gU/cm}^3$ têm sido usadas em vários reatores de pesquisas em funcionamento no mundo. A aprovação formal¹³ para a utilização deste combustível nos reatores de pesquisa e teste norte-americanos foi dada em 1987, pela Comissão Reguladora Nuclear dos EUA (USNRC). Esta dispersão tem sido também considerada tanto para a utilização inicial¹⁴ no novo reator de pesquisa e teste de materiais francês Jules Horowitz Reactor (JHR), como também no Reator Mutipropósito Brasileiro (RMB), em fase de concepção no País. Testes de irradiação de placas combustíveis contendo U_3Si_2 -Al ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) foram conduzidos com sucesso no reator BR2 (SCK.CEN) aplicando condições operacionais severas, representativas daquelas esperadas para o reator JHR, confirmando bom desempenho do combustível (Leenaers et al., 2008; Anselmet et al., 2009). Placas combustíveis com dispersões de U_3Si_2 -Al com até $6,0 \text{ gU/cm}^3$ têm sido fabricadas e testadas sob irradiação pela empresa francesa CERCA, utilizando um processo patenteado (IAEA, 2009; ANL, 2010).

No intuito de continuar o desenvolvimento de combustíveis na Instituição, o IPEN/CNEN-SP decidiu aumentar a concentração de urânio nos seus combustíveis de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al até as densidades já internacionalmente qualificadas para estes compostos, de $3,2$ e $4,8 \text{ gU/cm}^3$, respectivamente (Silva et al., 2008).

3.2. Principais fenômenos que ocorrem no combustível nuclear durante a irradiação

Durante a irradiação do combustível nuclear no núcleo do reator, ocorre uma larga variedade de reações nucleares e processos físicos associados. Como consequência, a composição e as propriedades físicas e químicas do combustível, assim como do material de revestimento do combustível nuclear, são alteradas com o tempo, sofrendo degradações das suas propriedades durante a irradiação. Os principais fenômenos que ocorrem durante a irradiação e as características que influenciam no desempenho dos combustíveis a dispersão são relacionados abaixo e discutidos a seguir:

¹³ U.S. Nuclear Regulatory Commission Report "Safety Evaluation Report Related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide-Aluminum Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors" NUREG-1313 (July 1988).

¹⁴ Enquanto não for concluído o processo de qualificação sob irradiação do combustível U-Mo.

- (i) Densificação da partícula combustível no início da queima
- (ii) Inchamento da partícula combustível
- (iii) Reações químicas entre a partícula combustível e a matriz
- (iv) Liberação de produtos de fissão
- (v) Inchamento e endurecimento das ligas de alumínio e
- (vi) Corrosão do revestimento

Adicionalmente, influenciam no comportamento sob irradiação:

- Distribuição da densidade de fissões;
- Temperatura limiar para empolamento;
- Integridade mecânica da ligação metalúrgica entre o revestimento e o cerne da placa combustível

3.2.1. *Densificação da partícula combustível*

A densificação da partícula combustível é decorrente da dissolução dos poros originados durante o processo de fabricação, promovida pelo recuo de produtos de fissão no início da queima. A dissolução dos poros produz uma dispersão do excesso de lacunas na partícula combustível e a migração destas lacunas para os contornos de grãos, o que resulta em um aumento da massa específica e diminuição do volume da partícula combustível, com conseqüente formação de vazios ao seu redor. Estes vazios serão importantes para a acomodação e armazenamento dos produtos de fissão gerados ao longo da queima, colaborando desta forma para uma redução do inchamento da placa combustível.

3.2.2. *Inchamento do combustível*

Durante a irradiação, placas combustíveis aumentam na espessura como um resultado do inchamento do seu combustível. O inchamento do combustível é resultante do acúmulo de produtos de fissão gasosos nas porosidades existentes nas partículas combustíveis, provenientes da fabricação e/ou da irradiação, originando desta forma bolhas de gases de fissão. Se estas bolhas se encontram distribuídas homogêneas por todo o combustível sem tendência alguma à interligação, o inchamento apresentado pela placa será pouco significativo. No entanto, se estas bolhas se encontram próximas umas das outras com uma grande tendência à interligação das mesmas, o inchamento apresentado pela placa combustível será uniforme e de grande magnitude. No caso de haver interligações de bolhas e se esta for localizada, o que se observará externamente à placa

combustível é a ocorrência de algumas bolhas (empolamentos). Embora o acúmulo de produtos de fissão seja diretamente proporcional à queima do urânio, o inchamento resultante é também afetado por várias mudanças micro-estruturais que podem ocorrer no combustível durante a irradiação (Simões, 1993).

Segundo Rest (1995), um importante fator na redução do inchamento do combustível é a sinterização induzida pela irradiação, que diminui a porosidade de fabricação. A porosidade de fabricação dentro das partículas de U_3O_8 , assim como as trincas e folgas resultantes do processo de fabricação, resultam em cavidades esféricas após a irradiação. Na medida em que uma fração substancial dessas cavidades formadas pode ser ocupada pelo inchamento do combustível, um volume de vazios de fabricação adequado pode reduzir substancialmente o inchamento líquido.

De acordo com o trabalho dos pesquisadores Solis, Taboada e Rest (1998), é suposto que ocorram os dois processos em paralelo: de densificação (diminuição do volume) e inchamento (aumento do volume), sendo que após o fechamento da porosidade de fabricação, ocorre um inchamento líquido do cerne. Sob essas suposições, tendo em mãos dados de inchamento do cerne, é possível avaliar o inchamento efetivo da "partícula combustível" como sendo:

$$\text{inchamento efetivo da "partícula"} = \frac{(\text{inchamento do cerne} + \text{porosidade de fabricação})}{(\text{fração volumétrica do combustível na dispersão})} \quad (3.1)$$

Além disto, o inchamento das placas combustíveis é dependente da temperatura de irradiação, da densidade do combustível e da concentração do combustível na dispersão, uma vez que a quantidade de vazios aumenta com o aumento do teor de urânio na placa.

Simultaneamente com o inchamento, pode ocorrer nas placas combustíveis diminuição da condutividade térmica do cerne em função da diminuição da condutividade térmica das partículas combustíveis e da diminuição da condutividade térmica da matriz metálica. A variação deste parâmetro tem grande influência na temperatura da placa combustível. Os principais responsáveis pela diminuição da condutividade térmica das partículas combustíveis são os gases de fissão presentes nas bolhas formadas nestas partículas ao longo da queima, as quais possuem condutividades térmicas muito baixas. Já a diminuição da condutividade térmica da matriz é provocada pelos fragmentos de fissão, principalmente os gasosos, que possuem condutividades térmicas bem inferiores à deste material.

O inchamento e a integridade mecânica da placa combustível são os dois aspectos mais importantes a serem acompanhados nos combustíveis irradiados. O inchamento da placa

combustível causa um decréscimo no volume do canal de refrigeração do EC, levando à diminuição da vazão de refrigerante e a um aumento das temperaturas na superfície da placa, com aumento das temperaturas no cerne. O inchamento da placa combustível que pode ser tolerado deve ser determinado durante o projeto termo-hidráulico do EC (AIEA, 2009).

Com relação às taxas de inchamento da matriz e do combustível presente no cerne, pode ser visto que o inchamento do combustível é várias ordens de grandeza maior que o inchamento da matriz. Uma vez que o inchamento sob irradiação do material do revestimento é desprezível, o inchamento da placa combustível resulta efetivamente apenas do inchamento do combustível do cerne. Assim, o inchamento em placas combustíveis resulta no aumento da espessura apenas, enquanto que a largura e comprimento permanecem relativamente inalterados (Rest, 1995).

3.2.2.1. *Inchamento do U_3O_8 -Al*

Dados experimentais de inchamento do U_3O_8 -Al, obtidos por Rest (1995) em PIE de miniplacas, são apresentados na FIG. 2.

FIGURA 2 - Dados experimentais obtidos em PIE versus resultados de inchamento percentual das miniplacas de U_3O_8 -Al calculados pelo DART.
(Solís et al., 1998)

Nessa figura, também são apresentados valores de inchamento calculados pelo programa computacional DART (Dispersion Analysis Research Tool), desenvolvido no Laboratório Nacional de Argonne (ANL), EUA, que reproduziu para altas queimas os dados experimentais de inchamento do combustível (Rest, 1995; Solís et al., 1998). As curvas obtidas

pelos pesquisadores indicam que as dispersões de U_3O_8 -Al apresentam inchamento positivo somente após alcançar altas queimas (superiores àquelas normalmente alcançadas na utilização dos combustíveis no reator).

3.2.2.2. *Inchamento do U_3Si_2 -Al*

O relatório de análise de segurança do reator OPAL (ARPANSA, 2004) apresenta que o aumento no volume médio observado em miniplacas de U_3Si_2 fabricadas no ANL, com baixo enriquecimento (19,9% ^{235}U) e com densidades de urânio no combustível de 3,72 a 5,6 gU/cm³, para densidades de fissão de aproximadamente 2×10^{21} fissões/cm³, foi abaixo de 5%. Apresenta, adicionalmente, que medidas de espessura de placas combustíveis de U_3Si_2 , de características similares às usadas no reator OPAL (com densidade de 4,8 gU/cm³, espessura do cerne de 0,61 mm e revestimento com 0,37 mm, totalizando a espessura da placa combustível interna em 1,35 mm) e irradiadas no reator ORR (*Oak Ridge Reactor*), até queimas médias de 77% de átomos de ^{235}U (de $1,0$ a $2,2 \times 10^{21}$ fissões/cm³) mostraram aumentos de espessura inferiores a 4%.

Na FIG. 3 são apresentados dados experimentais obtidos em PIE para o inchamento da partícula combustível de U_3Si_2 -Al (LEU) utilizado na forma de placas e varetas combustíveis. Nessa figura, são também apresentados valores de inchamento calculados usando o programa DART (Rest, 1995).

FIGURA 3 - Fechamento de poros presentes nas partículas combustíveis de U_3Si_2 -Al, de placas combustíveis contendo dispersões com fração volumétrica de combustível de 50% e porosidade inicial de 13%, em função da densidade de fissões. (Hofman e Ryu, 1991).

Para as miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) tratadas neste trabalho, as densidades de fissão calculadas no capítulo 5, totalizam $2,82 \times 10^{21}$ e $4,52 \times 10^{21}$ fissões/ cm^3 , respectivamente, para as queimas de 50% e 80% dos átomos de ^{235}U . Estas densidades de fissões correspondem, no gráfico da FIG. 4, a percentuais de inchamento de aproximadamente 9% e 23%. Considerando a espessura nominal da miniplaca de 1,52 mm (cerne de 0,76 mm e revestimentos de 0,38 mm) e os percentuais de inchamento citados, os aumentos na espessura do cerne correspondentes para as queimas de 50% e 80% seriam de 68 μm e 175 μm . A estimativa das espessuras das miniplacas, ao final destas queimas, sem considerar as camadas de óxidos que possam estar presentes nas suas superfícies, conduz aos valores de 1,588 mm e 1,695 mm, respectivamente.

FIGURA 4 - Dados experimentais de inchamento versus a densidade de fissões, comparados com valores calculados pelo programa DART. (Rest, 1995).

PIE de EC de tamanho integral com U_3Si_2-Al ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) provenientes de diversos fabricantes (AREVA-CERCA, NUKEM e B&W) e irradiados no reator ORR, com queimas médias de 50 a 55% de ^{235}U e altas queimas até 80% ^{235}U , permitiram a obtenção de medidas de espessura de placas combustíveis, as quais indicaram, respectivamente, aumentos médios na espessura variando de cerca de 40 μm nas regiões de queimas normais e cerca de 50-110 μm nas regiões com altas queimas. A variação na

mudança de espessura em altas queimas apresenta boa correlação com a quantidade de porosidade inicial (“como-fabricada”) nas placas (Copeland, Hofman e Snelgrove, 1988; IAEA, 2009).

O relatório de qualificação do combustível U_3Si_2 -Al com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (NUREG-1313), apresenta correlação para o inchamento do combustível U_3Si_2 -Al em função da densidade de fissões (queima) ocorrida na placa combustível, onde é atribuído um percentual de inchamento de 6% para uma densidade de 10^{21} fissões/cm³. Esta correlação encontrou boa concordância com os resultados obtidos nos testes de irradiação conduzidos no reator Siloé (Fr) utilizando o dispositivo IRIS. Ao final de cada ciclo de irradiação, as placas combustíveis (*full size*) eram extraídas do dispositivo de irradiação e realizadas as medidas de espessura usando uma bancada de testes subaquática tendo possibilitado a verificação das mudanças de espessura, ciclo após ciclo (IAEA, 2009).

Suripto et al. (1994) obtiveram resultados de PIE do primeiro EC LEU com U_3Si_2 -Al (com $3,2 \text{ gU/cm}^3$) produzido no *Nuclear Fuel Element Center* - NFEC, BATAN, Indonésia. O EC foi irradiado até uma queima de pico de ^{235}U de 62%. Os resultados mostraram que o comportamento sob irradiação daquele EC era similar a outros combustíveis tipo placa com U_3Si_2 -Al produzidos e testados em outras Instituições. O principal efeito da irradiação sobre as placas combustíveis verificado foi o aumento na espessura de 30-40 μm (2,5-3,0%). Verificou-se por medidas metalográficas que este aumento da espessura foi quase inteiramente devido à formação de uma camada de corrosão (*boehmita*) e que a contribuição do inchamento do combustível no aumento da espessura foi relativamente pequena (menos de 10 μm), compatível com a queima do combustível e com a relativamente moderada fração em volume inicial (pré-irradiação) do combustível de 27% no cerne combustível. Aqueles pesquisadores apresentaram, adicionalmente, valores de espessura de camada de óxido medidos para o mesmo material (AlMg_2) irradiado no ORR.

3.2.3. *Deterioração da ligação metalúrgica na interface cerne - revestimento*

A miniplaca ou placa combustível deve resistir às tensões induzidas durante a irradiação pelo: (i) inchamento do combustível, (ii) expansão térmica diferencial do cerne e do revestimento e (iii) forças hidráulicas. A resistência da ligação metalúrgica entre o cerne e o revestimento é uma propriedade muito importante das placas combustíveis, devido às potencialmente sérias consequências advindas da separação do revestimento e do cerne durante a irradiação. Fatores de escala associados podem ser significativos. Assim a adequada resistência de ligação metalúrgica deve ser demonstrada por testes de irradiação

satisfatórios de placas combustíveis de tamanho integral. Desde que significativas expansões térmicas diferenciais podem ocorrer na interface cerne-revestimento durante o início de operação e no desligamento, os testes de irradiação das placas combustíveis devem ser conduzidos durante vários ciclos de operação do reator.

3.2.4. *Reações químicas entre a partícula combustível e a matriz*

3.2.4.1. *Reações químicas nas dispersões U_3O_8 -Al*

No combustível tipo dispersão de U_3O_8 -Al, a mistura dos dois materiais não fica em equilíbrio termodinâmico, sendo que sob condições apropriadas, pode ocorrer uma reação exotérmica conhecida como "reação termita". Estudos mostraram que a reação termita¹⁵ ocorre preferencialmente em dois estágios: um *inicial* muito rápido por volta de 600 °C (reação 1) que corresponde à redução do U_3O_8 para UO_2 e outro mais lento por volta de 950 °C (reação 2) que corresponde à redução do UO_2 para um ou mais compostos intermetálicos de urânio-alumínio (Simões, 1993).

Esta *reação termita*, entretanto, tem sido de pequeno interesse desde que as temperaturas praticadas na fabricação da placa combustível vão somente até 500 °C e portanto ocorre muito pouca reação. As temperaturas de operação das placas combustíveis no reator são muito menores que estas, frequentemente menores que 100 °C, de maneira que o potencial da reação termita foi considerada sem consequências, exceto no evento de um acidente de perda de refrigerante (LOCA - *Loss of Coolant Accident*) envolvendo derretimento do núcleo. Para analisar esta possibilidade, estudos foram empreendidos para a determinação das temperaturas de ignição e a magnitude da evolução do calor para uso em análises de segurança (Fleming e Johnson, 1962 apud Simões, 1993). Os estudos mostraram que a liberação de energia de pico ocorre na faixa de carregamento entre 55 a 75% em massa de U_3O_8 na dispersão, que é a região de interesse para o desenvolvimento do combustível de U_3O_8 de alta densidade. Entretanto, foram repetidos pelos pesquisadores

¹⁵ O termo "reação termita" é comumente utilizado para designar uma classe de reações exotérmicas que ocorrem, tipicamente, entre um metal e um óxido (Wang et al., 1993).

da época os testes para determinação das temperaturas de ignição e máximo calor liberado para as composições de interesse usando análises térmicas diferenciais e aquecimento de miniplacas combustíveis (Pasto et al., 1980 apud Simões, 1993).

Testes adicionais para estudo das reações entre o U_3O_8 e o alumínio foram conduzidos em ambientes fora do reator, utilizando dispersões com alta concentração em massa de U_3O_8 (>75%). Os estudos mostraram que a temperatura de ignição da reação estava por volta de 900 °C (de acordo, portanto, com os resultados anteriores) e que as energias liberadas estavam muito abaixo das previstas, sendo em geral bem menores que as energias necessárias para iniciá-las. O aquecimento de placas de testes até temperaturas próximas a 1400 °C não apresentou liberações de gases, efeitos térmicos violentos ou explosões. Estes resultados serviram para comprovar que a utilização destas dispersões, mesmo sob altas temperaturas, não comprometeria a segurança do reator (Copeland e Martin, 1980; Simões, 1993).

Estudos posteriores realizados por Marra e Peacock (2005), referentes à fabricação do cermet U_3O_8 -Al, para a determinação da energia liberada pela *Reação Termita*, revelaram que, durante a fabricação do combustível cermet de U_3O_8 -Al pela técnica de metalurgia do pó, uma significativa porção do U_3O_8 é reduzida para U_4O_9 . Por este motivo, o processo de aquecimento das placas combustíveis para a laminação a quente deve ser definido e bem controlado de forma a evitar a ocorrência significativa dessa reação. A reação entre o U_4O_9 e o Al é também exotérmica; entretanto, o máximo calor liberado pela reação é substancialmente menor que aquele liberado pela reação do U_3O_8 -Al, aproximadamente 335 J (80 cal) por grama de óxido reagido comparado a 940 J (225 cal). Reações de redução metalotérmica para misturas U_3O_8/U_4O_9 /Al não ocorrem nas temperaturas normais de operação do combustível no reator (~100 °C) ou em temperaturas abaixo do ponto de fusão do alumínio (660 °C).

3.2.4.2. Reações químicas nas dispersões U_3Si_2 -Al

A união das fases U_3Si_2 e alumínio também não constitui uma mistura em equilíbrio, podendo ocorrer entre estes dois materiais, sob condições apropriadas (Ryu et al., 2006), as seguintes reações (Simões, 1993):

Dentre as reações supracitadas, a mais provável de ocorrer a temperaturas superiores a 500 °C é a reação da expressão (3.8). O produto resultante desta reação, o $3\text{U}(\text{Al}_{7/9}\text{Si}_{2/9})_3$, é menos denso que os reagentes. Sendo assim, a formação deste composto proporciona um leve aumento de volume à dispersão.

Segundo Simões (1993), o inchamento das placas inicia-se quando o alumínio se difunde para a interface de contato com o combustível (a difusão é maior nos contornos de grão) reagindo com ele e formando o $\text{U}(\text{Al},\text{Si})_3$. Entretanto, os produtos resultantes destas reações ficam localizados em uma região imediatamente adjacente à partícula combustível, envolvendo-a, porque o U_3Si_2 praticamente não possui contornos de grão. Isto explica porque o aumento de volume sofrido por esta dispersão (devido às reações) não é muito significativo. As taxas de reação entre o U_3Si_2 e o alumínio durante a irradiação são extremamente pequenas e a reação só ocorre na região de recuo dos fragmentos de fissão ao redor das partículas combustíveis, ficando, portanto, limitada a esta região.

Cuidados devem ser tomados ao longo do processo de fabricação da placa combustível para evitar ou minimizar a ocorrência de possíveis reações químicas entre a matriz e as partículas combustíveis do cerne. Como estas placas são submetidas a temperaturas iguais ou superiores a 500 °C em algumas etapas como, por exemplo, na laminação ou na realização do teste de empolamento (*blister*), é imprescindível que as mesmas não permaneçam a estas temperaturas por muito tempo. Caso contrário, o cerne possuirá níveis de "impurezas" superiores aos especificados, podendo não apresentar um bom desempenho sob irradiação.

3.2.5. *Liberação de produtos de fissão*

Produtos de fissão (PF) são somente liberados do cerne de uma miniplaca ou placa combustível durante irradiação se existir um defeito no revestimento que proporcione passagem para o escape de produtos de fissão gasosos. O defeito no revestimento pode ser resultado de:

- a) Problemas de fabricação ou do material, tais como:

¹⁶ A reação química balanceada correspondente à equação (3.8) resulta: $\text{U}_3\text{Si}_2 + 7 \text{ Al} \rightarrow 3\text{U}(\text{Al}_{7/9}\text{Si}_{2/9})_3$ (Ryu et al., 2006).

- Bolhas ou imperfeições no material de revestimento;
- Revestimento com ligação metalúrgica insuficiente com o *cerne*;

b) Problemas operacionais, tais como:

- Corrosão excessiva do revestimento devido à baixa qualidade da água ou alta densidade de potência local;
- Desgaste mecânico (*fretting*) devido à vibração;
- Erosão por *debris*¹⁷ ou outro material estranho;
- Manuseio indevido da miniplaca combustível.

c) Formação de bolha ou empolamento (*blister*) durante a irradiação, que pode resultar de um problema de fabricação;

d) Fusão de uma porção do revestimento.

3.2.6. *Inchamento e endurecimento das ligas de Al*

A aglomeração de lacunas na estrutura cristalina do alumínio resulta em seu inchamento. O inchamento varia em magnitude dependendo do tipo de alumínio utilizado e aumenta com a diminuição de elementos de liga ou de impurezas.

Rest (1995) sugere que o inchamento da matriz é várias ordens de grandeza menor que o inchamento das partículas combustíveis do *cerne* e que sendo o inchamento sob irradiação do material do revestimento desprezível, o inchamento da placa combustível resulta efetivamente somente do inchamento do combustível do *cerne*. O inchamento em placas combustíveis resulta no aumento da espessura apenas, enquanto que a largura e comprimento permanecem praticamente inalterados.

A irradiação com nêutrons causa endurecimento nas ligas de alumínio, acarretando o aumento das suas tensões de escoamento e de ruptura e na diminuição da sua ductilidade. A magnitude destas variações depende da temperatura de irradiação e da fluência neutrônica.

Segundo Simões (1993), no Al-1100, irradiado na temperatura de 55°C e fluxo integrado máximo de $2,3 \times 10^{23}$ n/cm² (térmicos), a tensão de escoamento aumenta de 50 para 220 MPa e a tensão de ruptura aumenta de 90 para 250 MPa. O alongamento total diminui de 32% para 12% para fluências neutrônicas de 4×10^{21} n/cm². Acima desta fluência, o alongamento diminui para 4%. O alongamento uniforme diminui de 16% para 4% em fluxos integrados de 3×10^{21} n/cm², permanecendo em 4% até um fluxo integrado de

¹⁷ Fragmento metálico que possa causar danos ao revestimento do combustível nuclear

$1,4 \times 10^{23}$ n/cm². Com o aumento da temperatura do teste para 150 °C, há diminuição na resistência mecânica e na ductilidade. A ductilidade uniforme atinge 2% a um fluxo neutrônico integrado de 3×10^{21} n/cm², permanecendo neste valor até um fluxo integrado de $1,4 \times 10^{23}$ n/cm². Já para a liga de Al-6061-T6 irradiada a 55 °C e a um fluxo neutrônico integrado máximo de 3×10^{23} n/cm² (térmicos), a tensão de escoamento aumenta de 280 para 450 MPa e a tensão de ruptura de 320 para 490 MPa. O alongamento total é reduzido de 15% para 9% e o alongamento uniforme de 10% para 4% para fluxos neutrônicos integrados maiores que 1×10^{22} n/cm² (de nêutrons rápidos). Com o aumento da temperatura para 100°C e, posteriormente, para 150°C, ocorre uma diminuição na resistência mecânica e na ductilidade. A diminuição da ductilidade é maior na temperatura de 150°C, onde o alongamento uniforme atinge aproximadamente 1% a 3×10^{21} n/cm² (de nêutrons rápidos).

Para a irradiação das miniplacas no reator IEA-R1 com operação a 5,0 MW, as temperaturas estimadas no revestimento das miniplacas e componentes do DIM durante a irradiação deverão ser inferiores a 95 °C e a fluência neutrônica de 3×10^{21} n/cm² (de nêutrons rápidos) no material estrutural destes (Al 6061) somente será alcançada após irradiação de 3 anos. Ao final dos períodos de irradiação de 9,3 e 14,9 anos¹⁸ as fluências neutrônicas máximas estimadas (nêutrons rápidos) nos materiais desses componentes são 9×10^{21} e $1,5 \times 10^{22}$ n/cm².

3.2.7. Corrosão do revestimento

Uma das características exigidas dos materiais utilizados como revestimento e matriz de placas combustíveis é a alta resistência à corrosão. A resistência à corrosão do material de revestimento deve ser tal que permita um desempenho satisfatório da placa combustível durante todo o período de irradiação e também durante o período seguinte de estocagem temporária na piscina do reator (que pode ser de dezenas de anos), até que o mesmo seja transferido para um local de armazenamento definitivo.

Desde o princípio do desenvolvimento da energia nuclear, o alumínio tem sido utilizado como material de revestimento de combustíveis nucleares. Suas propriedades mecânicas combinadas com baixa absorção de nêutrons e boa resistência à corrosão de suas ligas levaram-no a ser o principal material de revestimento de combustíveis utilizado em reatores de baixa temperatura, do tipo piscina, como o reator IEA-R1 do IPEN/CNEN-SP.

¹⁸ Tempos médios estimados para os queimas de 50% e 80% de ²³⁵U inicial, reator a 5,0 MW e DIM na posição 36 da placa matriz (Vide Apêndice B).

Muitos estudos sobre a corrosão do alumínio foram realizados a partir da segunda metade da década de 1950 e na década seguinte, incentivados pelo seu uso como material estrutural em reatores de pesquisas do tipo piscina. Desta forma, a maioria dos dados sobre a corrosão do alumínio e dos fatores que a afetam, datam dessa época (Durazzo e Ramanathan, 2008).

Apesar de o alumínio ser um metal muito reativo, ele é altamente resistente a uma grande variedade de agentes químicos. Esta resistência é devida ao caráter inerte e protetor da camada ou película de óxido que se forma sobre a sua superfície. A composição do óxido formado sobre o alumínio é dependente da temperatura da água. O óxido protetor, entretanto, degrada-se em meio aquoso pela formação de vários óxidos hidratados na superfície externa da camada de óxido, deixando somente uma fina camada protetora de Al_2O_3 sobre a superfície do alumínio. Os óxidos hidratados mais frequentemente encontrados em testes de irradiação são a *bohemita* (alumina β , monohidratada $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e a *bayerita* (alumina α , trihidratada $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Tipicamente, a camada de *bayerita* é encontrada na superfície externa da camada de *bohemita* (Kim et al., 2008).

O termo “espessura da camada de óxido” geralmente refere-se à espessura total das camadas de óxido protetor (Al_2O_3) e óxidos hidratados ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Em meio aquoso ocorre formação de *bayerita* até temperaturas de aproximadamente 90 °C. Em temperaturas mais altas, ocorre mudança de estrutura cristalina, com formação de *bohemita*. Após a formação do filme passivo, a corrosão diminui sensivelmente. Sob baixas temperaturas e em vários meios, esta quase não ocorre (uma vez que este filme impede o contato do meio corrosivo com o metal). A cinética da corrosão a baixas temperaturas é do tipo parabólico, alta no início e diminuindo com o passar do tempo. Quando a camada de óxido é danificada sob condições em que o auto-fechamento (formação de nova camada de óxido) dessa camada de óxido danificada não ocorre, pode ocorrer corrosão localizada na forma de pites ou ataque intergranular (Durazzo e Ramanathan, 2008).

A corrosão (oxidação) em geral é bastante semelhante para as diferentes ligas de alumínio usadas como revestimento sob condições normais de temperaturas operacionais (< 160-170 °C) na interface revestimento-óxido. Porém, em temperaturas um pouco mais altas podem ser vistas diferenças na corrosão (Pawel et al., 1995). Espessas camadas de corrosão aparentam consistir de diferentes camadas de composições distintas. Uma vez que a condutividade térmica de uma camada de óxido firmemente aderida é baixa, com valor usualmente empregado de 2,25 W/m.K (Pawel et al., 1995; Griess et al.,

1964), quando se trata de múltiplas camadas, o valor da condutividade térmica resultante é provavelmente menor que esse valor. Consequentemente, a queda de temperatura através da camada de corrosão pode ser significativa.

Uma placa combustível de MTR sob irradiação pode sofrer dois tipos de corrosão: (i) corrosão uniforme (principalmente oxidação superficial) e (ii) corrosão por pite (localizada, que progride principalmente em profundidade).

3.2.7.1. Corrosão uniforme

É o resultado natural da irradiação do revestimento da placa combustível em água. Para revestimentos de alumínio, o produto da corrosão é uma mistura, dependente da temperatura, de óxidos de alumínio hidratados (*bayerita*, *boehmita*, *gibbsita*) e suas taxas de formação dependem do pH da água, da temperatura da interface revestimento-água, e do fluxo de calor. A proteção do filme de óxido de alumínio é mais estável em soluções aquosas com pH na faixa de 4,5 a 7 (IAEA, 2011).

Quando o pH não é baixo o suficiente, uma camada de corrosão excessivamente espessa pode ser formada. Uma vez que a condutividade térmica desta camada de óxido hidratado é baixa, a queda da temperatura através da camada de corrosão pode ser significativa, podendo levar aos problemas seguintes:

- i) Devido o menor coeficiente de condutividade térmica da camada de corrosão, ocorre aumento na temperatura do combustível. Assim, uma camada de corrosão excessivamente espessa pode ter um efeito significativo no comportamento sob irradiação do material combustível do *cerne*;
- ii) Quando a camada de corrosão alcança certa espessura que resulta em um determinado gradiente de temperatura através dela, a camada de óxido tende a escamar-se (ou esfoliar-se¹⁹), expondo uma nova superfície do revestimento à corrosão. Segundo Van Den Berghe (2011), a esfoliação ocorre preferencialmente quando as camadas de óxido alcançam espessuras da ordem de 70 μm . Se a escamação ocorre em um número de vezes suficiente em um dado local, o revestimento pode ser completamente consumido;
- iii) Se a camada de corrosão é excessivamente espessa, as mudanças nas temperaturas do revestimento e do *cerne* durante a subida de potência (no reinício de operação) e durante o desligamento do reator podem ser altas o suficiente para que a diferença

¹⁹ O termo esfoliação da camada de óxido é tratado na literatura como *oxide spallation* (Kim et al., 2008).

na expansão térmica do revestimento e a do *cerne* possa causar a separação ou descolamento do revestimento e do *cerne* (Huet et al., 2003, 2005), resultando em falha da placa combustível;

3.2.7.2. Corrosão por pite²⁰

Se precipitados ou partículas estranhas presentes no revestimento são expostas durante a irradiação à água refrigerante contendo certos íons, existe a possibilidade de que venha a ocorrer corrosão por pite, o que pode causar um furo através do revestimento em um tempo relativamente curto. A corrosão por pite pode ser prevenida tanto pela aplicação de uma fina camada de óxido, altamente aderente (também chamada de camada de passivação) sobre a superfície do revestimento no fim do processo de fabricação como pelo uso de uma liga de alumínio altamente resistente à corrosão. A resistência à corrosão por pite é muito sensível ao tipo da liga de alumínio usada para o revestimento (IAEA, 2009).

3.2.7.3. Fatores que influenciam a corrosão do Al

Segundo Durazzo e Ramanathan (2008) os seguintes fatores influenciam a corrosão do alumínio:

3.2.7.3.1. pH da água

O pH afeta a corrosão como resultado de seu efeito na solubilidade do produto de corrosão, afetando a eficiência do filme protetor de óxido formado. Valores muito altos e valores muito baixos de pH resultam em altas taxas de corrosão. A diminuição do pH de 5 para 4, ou o seu aumento de 7 para 9, ocasiona um aumento de 100 vezes na taxa de corrosão. O valor ótimo do pH para temperaturas ao redor de 90 °C está entre 5,5 e 6,0, faixa na qual é mínima a taxa de corrosão (Troutner, 1957 apud Durazzo e Ramanathan, 2008; IAEA, 2011). As especificações das características da água da piscina do reator IEA-R1²¹ são: pH entre 5,5 e 6,5; concentração de cloretos $\leq 0,2$ ppm; condutividade elétrica $< 2,0$ μ Siemens/cm e resistividade entre 0,5 e $1,0 \times 10^6$ Ω .cm.

3.2.7.3.2. Velocidade do meio corrosivo

A existência de movimento relativo entre a superfície do alumínio e o meio corrosivo exerce influência sobre a velocidade de corrosão. Em estudo realizado por Kawasaki et al. (1962) referente à corrosão do Al 1100 em água desmineralizada a 70 °C,

²⁰ Corrosão por pite: vem do inglês "pitting corrosion"

²¹ Especificações técnicas contidas no RAS do IEA-R1 (IPEN, 1998).

foi observado um aumento significativo na velocidade de corrosão com o aumento da velocidade da água sobre a superfície das amostras. A velocidade de corrosão variou de 0,04 mdd ($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{dia}$) em velocidade da água de 0,07 m/s para, até 0,37 mdd em velocidades de 6 m/s.

Dillon (1959) apud Durazzo e Ramanathan (2008) sugere que a cinética da corrosão dinâmica do alumínio é regulada pela dissolução do óxido formado. Para sistemas estáticos, a dissolução do óxido é bastante pequena e esta condição produz uma velocidade de corrosão que diminui com o tempo. Contudo, em sistemas dinâmicos, a espessura do óxido é regulada pelo atrito mecânico e dissolução pela água, atingindo uma espessura de equilíbrio e resultando numa cinética de corrosão linear.

Para as condições de irradiação atuais do reator IEA-R1, a velocidade média de escoamento da água refrigerante nos canais de refrigeração do EC é de 1,84 m/s (IPEN, 1998), considerada baixa quando comparada às de outros reatores de pesquisas de projetos mais recentes.

3.2.7.3.3. Superfície de transferência de calor

Quando uma superfície de alumínio que está sendo corroída é também uma superfície de transferência de calor, a temperatura da superfície do metal é maior que a temperatura da água. A presença deste gradiente de temperatura causa uma velocidade de corrosão maior do que a esperada para a temperatura em que a água se encontra. O aumento da temperatura na interface óxido-água devido à presença de fluxo de calor causa um aumento na dissolução do óxido protetor (Durazzo e Ramanathan, 2008).

3.2.7.3.4. Ciclagem térmica

A ciclagem térmica devido às condições operacionais do reator, também constitui-se num fator importante. Griess, Savage e English (1964), durante testes de corrosão de amostras de alumínio aquecidas eletricamente, verificaram o efeito da ciclagem térmica sobre o óxido formado. A inspeção superficial de amostras cicladas termicamente revelou o desprendimento de pequenas lascas, com diâmetro entre 0,8 e 1,6 mm, da camada aderente de óxido superficial. Isto foi observado em amostras que apresentavam a camada de óxido com espessura superior a 25 μm . Para espessuras inferiores a 25 μm , não foi observada nenhuma perda de óxido durante a ciclagem térmica. Os pesquisadores também observaram que as perdas de óxido resultaram principalmente da fase de aquecimento do ciclo térmico.

Para a irradiação das miniplacas no reator IEA-R1, o aspecto de ciclagem térmica apresenta-se importante, uma vez que a atual escala de operação do reator considera período semanal de operação por 62 h contínuas, seguido de desligamento.

3.2.7.3.5. Ligas de Al usadas como material estrutural e de revestimento

Elementos de liga podem ser adicionados ao alumínio para melhorar tanto algumas de suas propriedades mecânicas como a sua resistência à corrosão e oxidação. Os principais elementos de liga adicionados ao alumínio são: cobre, zinco, magnésio, manganês, silício, níquel e ferro.

Alumínio contendo elementos de liga pode ser utilizado como revestimento de combustíveis nucleares em reatores refrigerados a água a temperaturas entre 130 e 150°C. Em temperaturas um pouco mais altas, a corrosão generalizada aumenta sensivelmente e a temperaturas acima de 200°C começa a ocorrer corrosão do tipo intergranular, que leva à rápida desintegração do metal.

A resistência à corrosão do alumínio é dada pela formação de um filme de óxido protetor e aderente sobre a superfície do metal.

A liga Al 1100 começa a apresentar corrosão intergranular a temperaturas entre 150 e 200°C. Em alumínio de alta pureza (> 99,9% Al), a corrosão intergranular pode ocorrer mesmo a temperaturas de 100°C. A liga Al 6061 apresenta boa resistência à corrosão na faixa de temperatura até 200°C e tem sido empregada como revestimento nos atuais combustíveis a dispersão, fabricados no IPEN/CNEN-SP.

Em termos de desempenho sob irradiação é importante evitar que a corrosão do revestimento ocorra de uma forma excessiva, para que a placa mantenha a sua integridade ao longo da queima e também durante todo o período de armazenamento na piscina, sem ocorrência de falha que possa levar à liberação de produtos de fissão para o refrigerante.

3.2.7.4. Aspecto das camadas de óxido sobre o EC irradiado

Os maiores teores de Si presentes na composição química do alumínio da liga ABNT 6061 em relação à ABNT 1060, levam à formação de óxidos mais escuros sobre a superfície da placa combustível irradiada²². A liga ABNT 6061 tem sido empregada pelo IPEN/CNEN-SP no revestimento de seus combustíveis em substituição à liga ABNT 1060 que foi empregada nos EC iniciais (contendo U₃O₈-Al).

²² Comunicação pessoal de Lalgudi V. Ramanathan (CCTM, IPEN/CNEN-SP), em 08/06/2010.

3.2.7.5. Corrosão do revestimento nas condições operacionais do IEA-R1

De acordo com o trabalho de Durazzo e Ramanathan (2008), para as condições operacionais do reator IEA-R1, operando em níveis de potências entre 2,0 e 5,0 MW, a corrosão uniforme do revestimento de placas combustíveis apresenta cinética linear. Os pesquisadores realizaram testes de corrosão em experimento reproduzindo as condições operacionais (qualidade da água, velocidade de escoamento, temperatura) do reator nas potências citadas. As temperaturas superficiais do revestimento utilizadas nos testes foram calculadas considerando-se o fluxo de calor existente no reator IEA-R1, assim como as velocidades calculadas em função dos valores da vazão total de refrigeração do núcleo do reator IEA-R1. Foi considerado também que a ciclagem térmica, devida ao regime de operação do reator, não deve afetar a camada de óxido sobre a superfície da placa combustível (Griess et al., 1964), uma vez que sua espessura, como calculada, resultou inferior a 25 μm , e também, que a presença de irradiação não produz efeito significativo sobre a corrosão do alumínio. O experimento mostrou que após curto período inicial de exposição (4 dias), a camada de óxido atinge uma espessura máxima de equilíbrio devido à ação de dissolução/erosão do fluxo de água. As velocidades de corrosão uniforme observadas, nas condições do IEA-R1 às potências de 2,0 e 5,0 MW, foram 0,17 e 0,28 mdd ($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{dia}$) respectivamente, o que corresponde a uma penetração no revestimento de 2,24 e 3,70 $\mu\text{m}/\text{ano}$. As espessuras de equilíbrio da camada de óxido, observadas para operação a 2,0 e 5,0 MW, foram, respectivamente 0,97 μm e 0,65 μm . Em termos de corrosão uniforme, os pesquisadores concluíram que as placas combustíveis fabricadas segundo os procedimentos adotados pelo IPEN/CNEN-SP são bastante resistentes à corrosão, mesmo sob condições de operação do reator a 5,0 MW. Nestas condições, a penetração máxima seria de aproximadamente 37 μm em 10 anos de operação, o que corresponde a menos de 15 % de perda em espessura do revestimento.

Tendo a fabricação das miniplacas se utilizado dos mesmos materiais e procedimentos tecnológicos empregados na produção das placas combustíveis *full size* para os EC do IEA-R1 pelo Centro do Combustível Nuclear do IPEN/CNEN-SP, é assumido que estas apresentarão também boa resistência à corrosão.

3.3. Métodos para desenvolvimento e qualificação de combustíveis

Processos de desenvolvimento e qualificação de combustíveis para reatores nucleares de pesquisa incluem normalmente testes iniciais de irradiação de miniplacas

combustíveis, seguidos por testes de irradiação de placas combustíveis de tamanho integral (*full size*) e, finalmente, da verificação do desempenho e fabricação comercial através de testes de um grande número de placas em EC protótipos (Wachs, 2007).

Uma documento recentemente publicado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2009) apresenta uma abordagem bastante esclarecedora dos fundamentos e das melhores práticas para o desenvolvimento e qualificação de novos combustíveis LEU para uso em reatores nucleares de pesquisas, baseados na experiência de países que possuem tecnologia de desenvolvimento, produção e fornecimento internacional de combustíveis, a saber, Argentina, Canadá, França, República da Coreia e Estados Unidos da América. São discutidas as atividades básicas para as fases de (i) pesquisa e desenvolvimento e (ii) qualificação do novo combustível.

O resultado do processo de qualificação do combustível é o conjunto de informações necessárias para convencer tanto o Órgão Regulador como a organização operadora do reator de que o novo combustível pode ser utilizado de maneira segura em um reator de pesquisas específico. As informações que devem ser obtidas pelo fabricante do combustível para qualificar o novo combustível podem ser divididas em quatro grupos: (i) determinação das propriedades básicas do combustível não irradiado; (ii) determinação das propriedades “pré-irradiação” do cerne combustível e da placa combustível; (iii) propriedades do cerne combustível e da placa combustível irradiados e, (iv) propriedades do EC irradiado.

3.3.1. Fase I – Pesquisa e desenvolvimento

Nessa fase são realizadas atividades visando o desenvolvimento ou a melhoria das características do novo combustível, sendo que as principais atividades dessa fase envolvem: (i) desenvolvimento do projeto conceitual; (ii) desenvolvimento da fabricação do combustível; (iii) realização de testes preliminares (*out of pile testing*²³) do combustível; (iv) realização de testes de irradiação no reator nuclear e exames pós-irradiação (PIE), e (v) ponto de decisão – caminhar para o projeto final e para a fase seguinte, de qualificação do combustível, ou continuar a fase de desenvolvimento.

O primeiro passo consiste em desenvolver um projeto conceitual levando em conta requisitos específicos para o novo combustível LEU, aspectos de segurança, análise

²³ Testes *out of pile*: referem-se a testes com amostras de combustível não irradiado, que não envolvem irradiação em um reator nuclear (IAEA, 2009).

das técnicas de fabricação potenciais e as opções para disposição final do combustível. Baseados no projeto conceitual, são desenvolvidos um ou mais processos de fabricação para avaliação. Também são fabricadas amostras para os testes preliminares.

Devem ser realizados testes preliminares de caracterização dos materiais para determinar as propriedades básicas do combustível e do cerne “como fabricados” e também das propriedades da placa combustível. O conhecimento destas características do combustível antes da irradiação é essencial para que seja possível a avaliação das mudanças nas propriedades do combustível causadas pelos processos de fabricação e no comportamento do combustível sob irradiação.

Testes de irradiação e *PIE* de amostras (miniplacas ou placas combustíveis *full size*) irradiadas são realizados para avaliar o desempenho do novo material combustível e/ou material de revestimento ao longo do período de irradiação. As amostras irradiadas podem ser examinadas por meio de técnicas não destrutivas ou destrutivas.

Atividades de *PIE* não destrutivas podem ser realizadas na piscina do reator, tais como, inspeção visual, *sipping*, medidas dimensionais e varredura de raios-gama, entre outras. Atividades destrutivas são normalmente realizadas no interior de células quentes e podem consistir, por exemplo, do corte de amostras para exames metalográficos, ou mesmo da realização de teste de aquecimento para determinação da temperatura limiar para empolamento.

A realização de exames especializados em combustíveis e materiais irradiados no interior de células quentes requer diversas adaptações tanto nos equipamentos padrões de medidas como no projeto de ferramental adequado, de maneira a evitar a degradação dos mesmos e permitir que as etapas dos exames possam ser realizadas em ambiente com alta radiação.

3.3.1.1. Testes de irradiação de miniplacas combustíveis

O uso de miniplacas para a determinação inicial das propriedades básicas de irradiação é vantajosa, uma vez que estas são mais fáceis de fabricar em escala laboratorial e requerem menores quantidades de material combustível e, conseqüentemente, um maior número de amostras pode ser irradiado em um dado volume ou dispositivo de irradiação, possibilitando avaliar maior número de variáveis como combustível, revestimento e/ou métodos de fabricação. Adicionalmente, as conseqüências da falha de uma miniplaca combustível para a operação do reator são baixas devido às pequenas quantidades de combustível (Wachs, 2007). A principal meta desta etapa é identificar as propriedades

básicas do cerne combustível, tais como a interação combustível-matriz e o inchamento do cerne combustível. Os testes iniciais de irradiação de um novo combustível são usualmente realizados em condições de irradiação moderadas e até queimas moderadas. Medidas dimensionais entre ciclos de irradiação podem fornecer informações sobre a taxa limiar de inchamento ou queima a partir da qual se inicia inchamento excessivo (*onset of breakaway swelling*). Algumas recomendações para a fase de testes preliminares de irradiação de novos materiais combustíveis são:

- (i) Realização de medições dimensionais de miniplacas combustíveis, entre ciclos de irradiação, a fim de avaliar o inchamento do combustível e garantir que a largura dos canais de refrigeração, dependentes desse fenômeno, permaneçam dentro de limites aceitáveis. Se necessário, são realizados testes de *sipping* para verificar a integridade do revestimento. Eventualmente, testes hidráulicos no dispositivo de irradiação que contém as miniplacas (ou placas) combustíveis em testes também podem ser realizados, com a finalidade de averiguar o seu estado geral e para garantir que não existem vibrações anormais que possam danificar a estrutura dos combustíveis durante a irradiação no reator (Yehia et al., 2002);
- (ii) Realização de PIE no combustível irradiado incluindo: (a) varreduras de raios-gama para determinar a distribuição da densidade de fissão (queima); (b) exames visuais e medições dimensionais em células quentes; (c) exames microestruturais do cerne do combustível irradiado e revestimento (caracterização das fases e da interação entre as partículas combustíveis e o material da matriz, morfologia das bolhas de gases de fissão, oxidação do revestimento) e (d) análise radioquímica para determinação da queima absoluta;
- (iii) Preparação de relatório final dos exames pós-irradiação, contendo a avaliação técnica de desempenho do combustível frente às condições dos testes e expectativas para o mesmo. Este relatório deverá servir de base, a partir de uma perspectiva de desempenho sob irradiação, para uma decisão sobre a continuidade ou não do processo de qualificação do novo material combustível.

Entretanto, a utilização de miniplacas combustíveis com pequenas dimensões não dão informação sobre o desempenho mecânico sob irradiação de placas combustíveis

com as dimensões integrais (*full size*) ou mesmo do efeito do fluxo e gradientes térmicos nas direções axial e transversal (Wachs, 2007).

3.3.1.2. Testes de irradiação de placas combustíveis de tamanho integral

Testes de irradiação de placas combustíveis de tamanho integral (*full size*) poderão ser realizados para detectar eventuais efeitos de escala a que as placas combustíveis são sujeitas em relação às miniplacas (Wachs, 2007). Um dos efeitos vistos em pelo menos um teste de irradiação é a separação do revestimento do cerne combustível de uma placa combustível, devido à expansão térmica diferencial do revestimento e do cerne (Huet et al., 2003). Assim, exames pós-irradiação geralmente enfocam áreas de interesse, tais como a interface entre o revestimento e o cerne combustível, por exemplo.

Normalmente, são testadas de uma a seis placas combustíveis de tamanho integral, posicionadas em dispositivos de irradiação especiais. Dependendo do projeto, tais dispositivos de irradiação permitem que as placas combustíveis possam ser removidas para inspeções periódicas na piscina do reator. O dispositivo de irradiação IRIS, mostrado na FIG. 5, tem sido utilizado nos reatores de pesquisas franceses SILOÉ e OSIRIS (Bolcourt et al., 2005). O dispositivo IRIS permite a extração das placas combustíveis ao final de cada ciclo de irradiação, possibilitando a verificação das correspondentes mudanças de espessura, usando uma bancada de testes subaquática (Huet et al, 2005; AIEA, 2009).

FIGURA 5 - Dispositivo IRIS para testes de irradiação de placas combustíveis de tamanho integral. (Bolcourt et al., 2005; Huet et al., 2005).

As placas combustíveis podem ser inspecionadas visualmente e caracterizadas dimensionalmente após cada ciclo de irradiação, para procurar sinais de desempenho anormal que possam ser precursores para falha. Placas que mostrem sinais de desempenho anormal podem ser retiradas do dispositivo de irradiação. Estes testes proporcionam garantia do desempenho aceitável do combustível antes da condução de testes de EC protótipos completos, onde as consequências da falha de uma placa combustível são maiores (Wachs, 2007).

Nesse estágio, segundo a abordagem da IAEA (2009), o desenvolvedor do novo combustível deverá decidir, com base nas informações obtidas durante a fase de pesquisa e desenvolvimento, se existem informações suficientes e confiança no combustível para avançar para a fase de qualificação sob irradiação do combustível ou, se ainda são requeridos desenvolvimentos e testes adicionais para melhorar as características do produto e/ou processo de fabricação. Se for requerido trabalho adicional, então é preciso seguir os passos mencionados, conforme necessário. Se os resultados forem satisfatórios, então pode-se avançar para a Fase II, de qualificação do desempenho sob irradiação do combustível.

3.3.2. Fase II – Qualificação do desempenho sob irradiação

A Fase II é enfocada na qualificação do desempenho sob irradiação do EC protótipo *full size* usando o novo combustível desenvolvido, para demonstrar que o mesmo atende aos requisitos de desempenho especificados. Testes de irradiação do EC protótipo com tamanho integral comprovam que o combustível se comporta como projetado em todos os aspectos, e que pode consistentemente ser fabricado em uma maneira que não conduza a questões de desempenho do combustível.

Antes da fabricação dos EC protótipos para os testes de irradiação é recomendada a fabricação de um EC *dummy* completo (contendo urânio natural ou depletado no cerne) para verificar: (i) processos de fabricação; (ii) dimensões e tolerâncias de projeto; (iii) realização de testes hidráulicos do EC e (iv) avaliação da vibração do EC.

O termo “EC protótipo” pode representar tanto o EC parcial (com menor quantidade de placas combustíveis e posições restantes preenchidas com placas “dummy” para manutenção da geometria dos canais de refrigeração) como o EC completo (com todas as placas contendo material combustível no cerne).

Atividades típicas da Fase II envolvem:

- Desenvolvimento de projeto detalhado para o EC protótipo de teste, baseado nos requisitos de projeto, descrição do projeto conceitual e processo tecnológico para fabricação, baseado nas informações obtidas nos resultados da Fase I;
- Planejamento dos testes de qualificação;
- Irradiação de EC protótipos e realização de PIE (menos extensivos que aqueles realizados durante a Fase I).
- Emissão de relatório final sobre a irradiação e PIE;
- Relatório de qualificação do combustível;
- Licenciamento do combustível²⁴.

3.3.2.1. Testes de irradiação de EC protótipos

Após as etapas iniciais de irradiação de miniplacas e placas combustíveis de tamanhos integrais (*full size*), são introduzidos EC protótipos, de tamanho real, no núcleo. Estes foram os passos seguidos para a conversão do reator de pesquisa francês OSIRIS, do uso do combustível U-Al para o combustível UO₂ e, posteriormente, do UO₂ para o combustível U₃Si₂-Al (Yehia et al., 2002).

Normalmente, para comprovar o bom desempenho de um combustível sob irradiação, pelo menos dois EC protótipos desse combustível são irradiados para dar redundância em caso de um dos EC apresentar falha. O primeiro é irradiado até se alcançar a queima média normal de descarga estipulada para o combustível (aproximadamente 50% de queima da quantidade inicial do ²³⁵U) e a irradiação do segundo EC protótipo deve ser conduzida até que sejam alcançadas queimas mais elevadas, da ordem de 80%, para demonstrar as margens de segurança definidas.

3.3.2.2. PIE de EC protótipos

Após a irradiação dos EC protótipos, as atividades de PIE podem consistir de inspeção visual, medidas dimensionais (na piscina ou em células quentes) para determinação de deformações geométricas do EC, desmantelamento do EC, varredura de

²⁴ A prova de que o combustível é qualificado em relação a suas características de desempenho sob irradiação consiste na aprovação do Órgão Regulador para o uso do combustível, para ao menos um de seus reatores de pesquisa. O pedido de licença para usar um novo combustível feito pela organização operacional do reator deverá anexar um relatório de qualificação de desempenho de combustível para que sejam cobertas todas as questões relacionadas com o combustível (IAEA, 2009).

raios-gama das placas combustíveis para mapeamento do perfil de queima, corte e retirada de amostras de combustível para exames metalográficos, entre outros.

A demonstração do bom desempenho do combustível em EC protótipos foi referida como a atividade final (conclusiva) para a qualificação dos combustíveis de dispersão de U_3Si_2 em matriz de Al, e resultaram no relatório NUREG-1313²⁵ (Wachs, 2009).

3.3.3. *Novas aplicações de combustíveis previamente qualificados*

Para o caso de se pretender nova utilização de um combustível previamente qualificado em um novo projeto de EC, onde são planejados usos sob condições muito superiores às aquelas para as quais o combustível tenha sido originalmente qualificado, são feitas as seguintes considerações (IAEA, 2009):

- *Condições de irradiação dentro do envelope de habilitação anterior*

Neste caso, o comportamento inerente à irradiação do cerne combustível pode ser considerado como bem conhecido e a ênfase deve ser colocada em mostrar que qualquer alteração no projeto e fabricação dos EC deve ainda resultar em um desempenho satisfatório sob irradiação.

1. O caso mais simples é quando o projeto do EC é muito semelhante a um projeto para o qual o combustível tenha sido qualificado anteriormente, tendo o fabricante participado do desenvolvimento do combustível original e processo de qualificação de desempenho sob irradiação. Testes adicionais de irradiação, por exemplo, com novos EC protótipos, não são considerados necessários, a menos que seja especificamente exigido pelo Órgão Regulador;
2. Se o projeto do EC ou as condições hidráulicas previstas são significativamente diferentes daquelas para as quais o combustível tenha sido qualificado, deverá ser analisado o potencial de comportamento sob irradiação esperado do EC, com base em dados de qualificação existentes. O fabricante deve demonstrar, através da fabricação e exames destrutivos de um número representativo de placas combustíveis, que o cerne combustível e a ligação metalúrgica entre cerne e revestimento mantêm sua integridade durante o processo de fabricação.

²⁵ O documento NUREG-1313 (*Safety Evaluation Report Related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide-Aluminum Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors*) consiste no relatório de qualificação do combustível de dispersão de U_3Si_2 em matriz de Al, para uso em reatores de pesquisas e de testes de materiais (Wachs, 2007).

Dependendo dos detalhes das mudanças de projeto, recomenda-se a realização de testes hidráulicos para confirmar as propriedades mecânicas do EC. Somente se estudos analíticos, de fabricação ou hidráulicos identificarem pontos de interesse pode ser necessário realizar novas irradiações para qualificação adicional do EC. Os resultados deverão ser confirmados através da irradiação de pelo menos dois EC protótipos em condições normais de funcionamento do reator a que os mesmos são destinados para uso ou em um reator de testes capaz de simular a evolução das condições de irradiação. Normalmente, nenhum exame pós-irradiação dos EC protótipos, adicional aos exames visuais na piscina do reator é necessário, a menos que problemas aparentemente relacionados ao comportamento do combustível sejam descobertos durante o curso, ou após o término, das irradiações.

- Condições de irradiação fora do envelope de habilitação anterior

O processo de qualificação de um determinado combustível para um novo uso em um reator de pesquisas específico será baseado na qualificação original do combustível em questão e complementado por testes de irradiação específicos em condições representativas daquelas do reator de pesquisas em questão (temperatura, taxa de fissões, queima pretendida, etc.). A quantidade de esforços para a qualificação depende de quão afastado está o envelope das condições operacionais daquelas para as quais o combustível foi previamente qualificado:

- Se a expansão do envelope para qualificação requerida é relativamente pequena, os dados existentes podem ser extrapolados para as condições novas e usados para fornecer uma estimativa de desempenho esperado do combustível. Nesse caso, a irradiação de EC protótipos pode ser suficiente para estender a qualificação para as novas condições;

- Se uma grande expansão no envelope de qualificação é necessária para incluir maiores taxas de fissão, temperaturas de operação e densidades de fissão, então um programa de qualificação relativamente extenso será necessário, semelhante àquele para um novo combustível, como descritos nos itens 3.3.1 e 3.3.2.

3.3.4. *Requisitos dos testes para qualificação*

- i) O critério mais importante para qualificação do combustível é que tanto o cerne quanto a miniplaca ou placa combustível e o EC como um todo, devem comportar-se de maneira estável e previsível, durante irradiação em operação normal e durante

transientes operacionais previstos, até uma queima de ^{235}U suficientemente maior que as queimas normais de descarga (que são da ordem de 50 % de ^{235}U), (IAEA, 2009).

- *Comportamento estável* significa que:

- (i) O cerne combustível (e portanto, a miniplaca ou placa combustível) apresenta inchamento de uma maneira prevista e com taxa razoavelmente baixa até a queima requerida.
- (ii) O revestimento e o cerne permanecem ligados metalurgicamente, sem a ocorrência de bolhas ou empolamentos sob o revestimento. Entretanto, a resistência da ligação metalúrgica entre revestimento e cerne ou a resistência dos produtos de interação entre o revestimento e o cerne deve ser grande o suficiente para resistir a uma ruptura durante a ocorrência de deformações mecânicas ou expansões/contrações térmicas da placa combustível. Esta última situação deve ser considerada durante o início de operação e desligamento, e especialmente durante *scrams* (desligamentos rápidos e imprevistos do reator, por meio da queda de barras de controle).

- *Comportamento previsível* significa que o desempenho do combustível pode ser caracterizado em termos de parâmetros de irradiação, como, por exemplo, o inchamento do combustível, que pode ser previsto sob todas as condições de operação.

ii) O segundo critério mais importante para qualificação é a ausência de vazamentos de produtos de fissão (PF) durante a irradiação. Assim, os processos de fabricação devem resultar em revestimento sem trincas ou perfurações. Bolhas (empolamentos) não devem se formar durante a irradiação porque as tensões que são desenvolvidas durante a formação destas frequentemente resultam em trincas no revestimento, através das quais os PF gasosos que formaram os empolamentos podem escapar.

iii) Outro critério importante para a qualificação do combustível reside no requisito de que o seu processo de fabricação seja reprodutível e robusto.

3.4. Informações relevantes para a qualificação obtidas na fase de desenvolvimento

3.4.1. *Propriedades básicas do combustível não-irradiado*

O conhecimento das propriedades básicas do combustível é necessário para a interpretação do comportamento deste durante o processo de fabricação e sob irradiação,

bem como para o projeto da placa combustível e EC para aplicações específicas. Consequentemente, as características devem ser conhecidas durante o estágio de desenvolvimento para que sejam devidamente considerados na fabricação dos EC para qualificação e para o uso rotineiro no reator de pesquisas. As principais propriedades básicas do novo material combustível que devem ser determinadas/conhecidas nesta fase são: (i) Composição química do combustível e de suas fases; (ii) Capacidade térmica; (iii) Condutividade térmica; (iv) Propriedades do pó combustível, incluindo formato e distribuição de tamanho das partículas, densidade do pó, propriedades mecânicas, tamanho de grão e estrutura cristalina.

3.4.2. *Propriedades pré-irradiação do cerne e da miniplaca combustível.*

A determinação das propriedades pré-irradiação do cerne combustível e das miniplacas combustíveis “como-fabricadas” são necessárias para efetuar o projeto da placa combustível e análise de segurança e, uma vez que estas propriedades mudam quando o cerne é irradiado, as propriedades “como-fabricadas” fornecem o ponto de partida para a estimativa da evolução das mesmas durante a irradiação. Incluem a determinação das seguintes propriedades: (i) Frações em volume dos constituintes do cerne combustível; (ii) Capacidade térmica do cerne combustível; (iii) Condutividades térmicas do cerne e do revestimento; (iv) Coeficiente de expansão térmica do cerne; (v) Energia exotérmica liberada após aquecimento²⁶; (vi) Propriedades mecânicas da miniplaca.

3.4.3. *Outros parâmetros e propriedades de irradiação da miniplaca combustível*

Além dos fenômenos já citados, também influenciam no comportamento sob irradiação os seguintes parâmetros e propriedades:

- Distribuição da densidade de fissões;
- Temperatura limiar para empolamento;
- Integridade mecânica da ligação metalúrgica entre o revestimento e o cerne.

3.4.3.1. *Densidade de fissões no cerne*

Para interpretar propriamente o comportamento da miniplaca ou placa combustível e do seu cerne sob irradiação, deve-se conhecer a densidade de fissões associada com a amostra do combustível sob estudo (IAEA, 2009).

²⁶ Determinação da temperatura limiar para ocorrência da reação e quantificação da energia térmica liberada na "reação termita" entre a mistura do composto de urânio e o Al da matriz.

- Densidade de fissões no cerne: O mapeamento do perfil de queima do cerne combustível de uma miniplaca ou placa combustível fornece a distribuição relativa dos eventos de fissões, que é diretamente correlacionada com o perfil de potência integrado no tempo.
- Densidade de fissões nas partículas de combustível: Este é o valor de densidade de fissão mais usual no estudo de desempenho sob irradiação de um material combustível, uma vez que as fissões ocorrem no material combustível e causam os vários fenômenos que levam ao inchamento do combustível. O volume de referência do combustível é o volume do cerne “como fabricado”, porém este pode não ser apropriado quando ocorre uma interação substancial entre combustível e matriz no cerne do combustível tipo dispersão. Para o combustível tipo dispersão, deve-se dividir a densidade de fissões no *cerne* pela fração volumétrica de combustível na dispersão.

A densidade de fissões é normalmente expressa pelo número de fissões ocorridas por unidade de volume do combustível. Pode ser calculada ou medida através de métodos não destrutivos (espectrometria de raios-gama) da miniplaca ou placa combustível ou por meio de ensaios destrutivos da mesma em célula quente.

O cálculo da densidade de fissões pode ser feito a partir da taxa de reações de fissão (R_f) integrada ao longo do tempo de irradiação (expresso em segundos). O resultado obtido para o cerne deve ser dividido pela fração volumétrica de combustível na dispersão. A taxa de reações de fissão que ocorre na miniplaca (R_f) é dada pelo produto do fluxo médio de nêutrons pelo valor médio da seção de choque macroscópica de fissão correspondente. Desta maneira, a taxa de reações de fissão pode ser expressa na forma de (Lamarsh e Barata, 2001; Terremoto, 2004):

$$R_f = \bar{\Phi} \cdot \bar{\Sigma}_f \quad (3.9)$$

onde:

R_f = taxa de fissões, [fissões . cm⁻³.s⁻¹];

$\bar{\Phi}$ = fluxo médio de nêutrons, [n.cm⁻². s⁻¹];

$\bar{\Sigma}_f$ = valor médio da seção de choque macroscópica de fissão, [cm⁻¹].

e

$$\bar{\Sigma}_f = N \cdot \bar{\sigma}_f \quad (3.10)$$

sendo:

$\bar{\sigma}_f$ = valor médio da seção de choque microscópica, em [barn], (1 barn = 10⁻²⁴ cm²);

e

N = número de núcleos fisséis / volume de combustível no cerne, [átomos $^{235}\text{U}/\text{cm}^3$].

A densidade de fissões ocorridas no cerne da miniplaca é obtida pela multiplicação da taxa de reações de fissão R_f pelo tempo t de irradiação, medido em segundos.

$$\text{Densidade de fissões no cerne} = R_f \cdot t \quad [\text{fissões} \cdot \text{cm}^{-3}] \quad (3.11)$$

Finalmente, como as fissões ocorrem nas partículas combustíveis dispersas na matriz, então a densidade de fissões é obtida pela divisão do resultado obtido para o cerne pela fração volumétrica (f_v) de combustível na dispersão.

$$\text{Densidade de fissões no combustível} = (R_f \cdot t) / f_v \quad [\text{fissões} \cdot \text{cm}^{-3}] \quad (3.12)$$

3.4.3.2. Determinação da temperatura limiar para empolamento

A temperatura limiar para a formação de empolamentos ou bolhas (*blisters*) é definida como a temperatura na qual uma ou mais bolhas começam a aparecer sobre a superfície da placa combustível irradiada (IAEA, 2009). A temperatura limiar de empolamento é obtida através da realização de ensaio destrutivo no interior de célula quente²⁷.

Tradicionalmente, esta temperatura limiar para empolamento tem sido usada como um indicador da capacidade de uma placa combustível de suportar altas temperaturas resultantes das condições de funcionamento do reator. Ela é frequentemente usada nos reatores de pesquisa de baixa ou média densidade de potência, como uma temperatura limite na análise de perda de refrigerante ou de transientes devido a acidentes. Temperaturas limiares de empolamento de combustíveis, desenvolvidos com boas práticas de fabricação e que possuem adesão metalúrgica adequada entre os materiais do cerne e do revestimento, são tipicamente acima de 450 °C (IAEA, 2009).

²⁷ A miniplaca ou placa combustível irradiada é sequencialmente aquecida, através de incrementos bem definidos de temperatura, para se determinar a temperatura na qual os gases (principalmente os gases de fissão) presentes no cerne combustível se difundem para a interface cerne-revestimento em quantidade suficiente para deformar localmente o revestimento do combustível, formando uma bolha na interface cerne-revestimento do combustível (IAEA, 2009).

3.4.3.3. Integridade mecânica da interface revestimento-cerne

Deve ser demonstrado que o combustível é capaz de resistir a tensões durante a irradiação do cerne combustível devidas ao inchamento, dilatação térmica diferencial do cerne e do revestimento e proveniente das forças hidráulicas. A resistência da união entre o cerne e o revestimento é uma propriedade muito importante do combustível tipo placa, por causa das consequências potencialmente graves advindas da separação do revestimento e do cerne durante a irradiação. Fatores de escala podem ser significativos, de maneira que uma adequada resistência de ligação entre o revestimento e o cerne deve ser demonstrada pela irradiação de placas combustíveis de tamanho real. Uma vez que podem ocorrer significativas tensões devido a expansões térmicas diferenciais na interface revestimento-cerne durante a inicialização (*startup*) e desligamento do reator, os testes de irradiação das miniplacas e das placas combustíveis *full size* devem perdurar por diversos ciclos de irradiação do reator.

3.4.4. Demonstração do bom desempenho sob irradiação

A conclusão com sucesso dos testes de irradiação pode ser demonstrada pela aplicação de exames pós-irradiação:

- Integridade das miniplacas ou placas combustíveis (ausência de vazamento de produtos de fissão), demonstrada por ensaios de *sipping*;
- Ausência de deformação local nas miniplacas, tais como empolamentos ou bolhas e ausência de qualquer deformação de grande escala, tal como flambagem de placa, demonstrada por ensaios de inspeção visual;
- Que tanto o cerne como a placa combustível não apresentam desempenhos instáveis e imprevisíveis, e que as mudanças dimensionais são aceitáveis, tais como, aumento da espessura e deformação da placa combustível dentro das tolerâncias geométricas do projeto, demonstrados pelos ensaios de medidas de espessura;
- Exames metalográficos em células quentes de amostras obtidas das regiões de maior queima, maior inchamento e de queima média para determinar a microestrutura do cerne e a espessura da camada de óxido;
- Análises radioquímicas de pelo menos duas amostras para normalizar a distribuição de queima determinada pela varredura gama, a menos que o sistema de varredura gama forneça valores de queima absolutos.

3.5. Principais PIE de combustíveis de MTR

A realização de PIE de combustíveis visa a caracterização e o estudo de materiais combustíveis nucleares ou dos materiais estruturais associados. Os exames pós-irradiação são importantes na determinação do comportamento sob irradiação e da durabilidade dos combustíveis nucleares e materiais estruturais, uma vez que fornecem informações tecnológicas importantes para os projetistas, fabricantes de combustíveis e operadores de reatores.

PIE de amostras irradiadas permitem a determinação dos limites de utilização do novo combustível, particularmente em termos do máximo carregamento da fase dispersa de urânio na dispersão e a máxima queima do combustível.

A potência nuclear gerada na miniplaca combustível e as condições de refrigeração no dispositivo de irradiação podem ser, no entanto, consideravelmente diferentes daquelas que ocorrerão nas placas combustíveis dos EC do núcleo do reator. Neste contexto, a utilização, quando possível, de miniplacas instrumentadas ou mesmo um EC instrumentado com termopares, permite a validação experimental dos cálculos termo-hidráulicos. O uso de detectores do tipo SPND (*Self Powered Neutron Detector*) permite uma importante redução das incertezas relacionadas com os cálculos. Esta prática tem sido realizada na França, em alguns de seus reatores de pesquisas do tipo piscina. O objetivo final da utilização de dispositivos de irradiação instrumentados é demonstrar que os critérios de segurança neutrônico e termo-hidráulico, correspondentes ao novo combustível, são respeitados, com margens de segurança adequadas (Yehia et al., 2002).

Denomina-se *ensaio não destrutivo* (END) a qualquer tipo de ensaio aplicado a um material que não altere de forma permanente suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. Assim, os END caracterizam-se por não deixar marcas no componente ou material ensaiado (ABENDI, 2009). Por isso, podem ser efetuados em miniplacas e EC irradiados, para acompanhamento de itens específicos ou do seu estado geral, após ciclos sucessivos de irradiação no reator, sem qualquer risco de inutilizá-los em consequência dos ensaios.

PIE empregando procedimentos ou END dos combustíveis podem ser conduzidos tanto na piscina do reator de pesquisas quanto no interior de células quentes. PIE empregando procedimentos ou *ensaios destrutivos* (ED) de combustíveis irradiados são conduzidos normalmente no interior de células quentes especiais, equipadas com blindagens e paredes de chumbo ou de concreto.

Alguns dos principais métodos empregados em END e ED pós-irradiação para caracterização e qualificação de combustíveis em células quentes envolvem (Van den Berghe, 2011):

- END
 - (i) inspeção visual;
 - (ii) *sipping*;
 - (iii) medições dimensionais (de espessura e dimensões externas);
 - (iv) medição de densidade pelo método de imersão (em célula quente);
 - (v) medição de queima absoluta por espectrometria gama de miniplaca;
 - (vi) medição de queima média por espectrometria gama de EC completo;
 - (vii) medição de espessura dos óxidos (por correntes parasitas).
- ED
 - (i) preparação de amostras;
 - (ii) corte, embutimento e polimento (metalografia-ceramografia);
 - (iii) eletropolimento;
 - (iv) metalografia para medição da camada de óxido sobre o revestimento;
 - (v) metalografia para observação da microestrutura do combustível;
 - (vi) microscopia ótica (MO) e análise de microdureza Vickers;
 - (vii) determinação da temperatura limiar de *blister*;
 - (viii) densitometria;
 - (ix) micro-varredura gama;
 - (x) microscopia eletrônica de varredura com análise dispersiva de energia de raios-X (SEM-EDS);
 - (xi) microanálise de sonda eletrônica (EPMA-WDS);
 - (xii) espectrometria fotoeletrônica de raios-X (XPS);
 - (xiii) análise de difração de raios-X (XRD);
 - (xiv) microscopia eletrônica de transmissão (TEM);
 - (xv) determinação da queima por análise química de amostras;
 - (xvi) análise de gases de fissão retidos no cerne.

Na FIG. 6 é ilustrada a sequência típica dos principais END e ED aplicados, respectivamente, na piscina ou no interior de células quentes, para a caracterização de miniplacas combustíveis ou EC irradiados.

FIGURA 6 - Principais ensaios não destrutivos e destrutivos para caracterização pós-irradiação de combustíveis tipo placa de MTR.

3.5.1. *Inspeção visual*

Devido aos resultados produzidos, a inspeção visual tem se configurado como um dos mais importantes métodos não destrutivos empregados para exame de combustíveis irradiados. Este método é largamente empregado em piscinas de estocagem de combustíveis usados (PCU) de reatores de potência, piscinas de reatores de pesquisa e laboratórios de células quentes, proporcionando condições para melhor compreensão dos fenômenos envolvidos, ao longo e após a irradiação do combustível, buscando a maximização da queima do combustível nuclear.

A inspeção de componentes altamente radioativos utiliza-se de sistemas de câmeras subaquáticas especiais de TV, resistentes à radiação (ou não), que fornecem as imagens em monitores de vídeo, remota e adequadamente posicionados.

A experiência internacional tem mostrado que imagens de vídeo obtidas em inspeções visuais na piscina, entre os ciclos de irradiação, ou mesmo periodicamente ao longo do período de armazenamento de EC queimados, podem proporcionar informações

sobre a condição estrutural geral do EC ou mesmo do tipo de dano no combustível, além de estimativa da porção danificada do revestimento ou do cerne combustível exposto (Sindelar et al., 2002).

Inspeções visuais de componentes irradiados podem ser realizadas também no interior de células quentes, com objetivos de verificar o estado geral, medição de espessura do óxido presente sobre o revestimento e componentes do EC, determinação de defeitos e mudança da coloração dos óxidos, entre outros. A FIG. 7 ilustra a inspeção visual²⁸ através dos canais de refrigeração do EC, realizada no interior de uma célula quente (Alvarez et al., 2008). Pode ser notada a presença de um *blister* (empolamento) na superfície de uma placa combustível interna.

FIGURA 7 - Visualização de um *blister* em uma placa combustível de EC de MTR. (Alvarez et al., 2008)

Existe considerável esforço em se obter o máximo possível de informações do estado geral do EC irradiado para avaliação do comportamento sob irradiação dos mesmos por meio das inspeções visuais (Toscano, 2005).

3.5.1.1. Particularidades e limitações

A inspeção visual de combustíveis nucleares irradiados assim, como de outros componentes com alta atividade de radiação, provenientes do núcleo de reatores ou de instalações radiativas, requer normalmente o uso de blindagem adequada ou de câmeras de vídeo subaquáticas equipadas com sistemas de *zoom* e de controle de luminosidade

²⁸ A visualização através da janela de vidro plumbífero confere à imagem a tonalidade amarelada.

remotos, além de experiência no reconhecimento de defeitos. O componente que se quer examinar é normalmente mantido no interior de uma piscina contendo água, a qual proporciona blindagem biológica da radiação.

Ensaio de inspeção visual subaquática de EC tipo placa de MTR, como os realizados na piscina do IEA-R1, apresentam as seguintes vantagens: i) baixo custo operacional; ii) permitem obter informações do estado geral do EC, que podem dar indicativos das condições operacionais às quais o mesmo esteve submetido no reator durante a irradiação, ou mesmo danos provocados por manuseio. Todavia, a aplicação deste ensaio normalmente restringe-se às superfícies externas, acessíveis pelos sistemas convencionais de inspeção visual. Nos EC de reatores MTR a aplicação do ensaio visual é limitada, não sendo possível a visualização direta das superfícies das placas combustíveis internas. No entanto, a utilização de sistemas especiais mais recentes de inspeção visual, como por exemplo, do tipo endoscópio, já possibilita a visualização de ocorrências localizadas nos canais de refrigeração do EC tipo placa.

A norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN-NN-1.17 (CNEN, 1999), fornece as diretrizes para a qualificação de pessoal e certificação para ensaios não destrutivos em itens de instalações nucleares.

3.5.1.2. Fatores que influenciam as inspeções visuais de combustíveis

Alguns dos fatores que influenciam a qualidade das imagens durante inspeção visual de combustíveis na piscina são:

- Nível de iluminação;
- Movimentação/oscilação do combustível durante a inspeção visual;
- Condições de ajuste do foco;
- Degradação da câmera devido à dose absorvida de radiação;
- Altas ampliações da imagem ou circulação de água por convecção junto ao combustível podem provocar distorções e dificultar a nitidez da imagem.

3.5.1.3. Câmeras de vídeo subaquáticas para inspeção visual

Durante as inspeções visuais de EC irradiados, a câmera pode ser submetida a intensos níveis de radiação (essencialmente raios-gama de decaimento dos produtos de fissão contidos no interior das placas combustíveis). Qualquer câmera que possa operar em uma taxa de dose maior que 30 kGy/h e 2 MGy de dose cumulativa total é usualmente considerada como sendo resistente (ou tolerante) à radiação (Silva et al., 2009a).

Até a década de 1980, a maioria das câmeras empregadas para inspeção visual de combustíveis irradiados e componentes de reatores nucleares possuía alta resistência à radiação, com imagem preta e branca (B&W). Atualmente, as inspeções visuais podem ser realizadas empregando câmeras coloridas de alta resolução, porém com baixa resistência à radiação, que podem ser adquiridas com menores custos. Para tanto devem ser consideradas as características de blindagem da água, adotando o posicionamento da câmera numa distância adequada para proteção da mesma contra os efeitos da radiação, sendo utilizados os recursos do sistema de *zoom*.

Sistemas de inspeção visual especiais, do tipo endoscópio, permitem a inspeção visual de placas combustíveis internas do EC, sendo constituídos de tubos de pequeno diâmetro que utilizam fibras ópticas para a transmissão da imagem captada por lente de pequeno diâmetro (aproximadamente 1,5 mm) e para a iluminação da região a ser inspecionada.

3.5.2. *Sipping*

Ensaio de *sipping* é uma técnica não-destrutiva, empregada para avaliar a integridade estrutural do revestimento de combustíveis nucleares irradiados (Smith et al., 2010; Zeituni et al., 2004). A técnica é baseada na detecção do vazamento de produtos de fissão radioativos para o refrigerante devido à falha²⁹ do revestimento, usualmente por meio de espectrometria de raios-gama.

Para testes de *sipping* sobre miniplacas combustíveis irradiadas armazenadas por muitos anos dentro da piscina de estocagem, o produto de fissão mais recomendado para ser usado como monitor de falha é o ^{137}Cs , devido a sua meia-vida longa (30,14 anos), grande rendimento de formação na fissão e alta solubilidade na água (Perrotta et al., 1998). Entretanto, para testes de *sipping* de miniplacas combustíveis recém descarregadas do núcleo, a escolha de um monitor de falhas não é tão óbvia. As características de grande rendimento de produção na fissão e alta solubilidade na água permanecem como características indispensáveis do radionuclídeo a ser usado. Entretanto, neste caso a meia-vida do radionuclídeo deve ser muito menor, tipicamente cerca de alguns dias, para dar uma alta atividade específica à amostra e uma fácil identificação no espectro de raios-gama. O espectro de raios-gama obtido das medidas sobre as amostras de água de um EC

²⁹ O termo *falha* é definido na literatura, como uma trinca ou orifício penetrante no revestimento do combustível, através da qual produtos de fissão vazam para o refrigerante do reator.

falhado (IEA-156) do IEA-R1 mostrou claramente que ^{131}I e ^{133}I , isótopos radioativos do Iodo, com meias-vidas respectivamente iguais a 8,02 dias e 20,8 horas (Reus e Westmeier, 1983 apud Zeituni et al., 2004), são os monitores de falha adequados nestas condições. Uma evidência adicional para a escolha de ^{131}I e ^{133}I como monitores de falha em testes de *sipping* de miniplacas combustíveis recentemente irradiadas e descarregadas do DIM é que, logo após uma indesejável liberação de produtos de fissão, estes dois isótopos radioiodos são os radionuclídeos mais facilmente detectáveis por meio de espectrometria de raios-gama (Gopalakrishnan et al., 1995 apud Zeituni et al., 2004). Por outro lado, valores precisos para as atividades específicas e taxas de vazamento médio do ^{131}I e ^{133}I são difíceis de obter, devido às suas energias de pico características, correspondentes aos raios-gama com energias de 364,5 keV para o ^{131}I e 529,9 keV para o ^{133}I serem parcialmente encobertas pelos espectros dos Compton contínuos de muitos outros raios-gama com maiores energias. Nestas circunstâncias, para o caso do EC IEA-156, foi decidido esperar 6 meses para possibilitar o decaimento dos produtos de fissão de meia-vida curta e dos produtos de ativação nas amostras, de maneira a medir a taxa de vazamento média de ^{137}Cs do EC falhado para a água (Zeituni et al., 2004).

3.5.3. *Espectrometria de raios-gama*

A espectrometria de raios-gama é um método não destrutivo para a medida da distribuição relativa de produtos de fissão e da distribuição de queima sobre a área ativa de uma placa combustível. Esta técnica poderá ser utilizada após cada ciclo de irradiação e após o término da irradiação das miniplacas combustíveis de testes.

Para obter a informação necessária, são obtidos inicialmente os espectros de raios-gama em função das posições axiais e transversais ao longo do comprimento ativo e da largura ativa da miniplaca. As áreas líquidas abaixo dos picos de energia são determinadas, dando uma medida da quantidade de cada produto de fissão radioativo presente em cada local específico ao longo do espectro de raios-gama. Estas quantidades podem ser relacionadas à atividade absoluta total de um dado produto de fissão, usado como monitor de queima, o que possibilita a determinação do número total de eventos de fissão ocorridos e, portanto, a queima absoluta da miniplaca. Esta determinação, entretanto, requer calibrações de energia e de eficiência prévias do aparato experimental, além de um rigoroso controle de sua geometria, detalhado conhecimento do histórico de irradiação da miniplaca e cuidadosa avaliação de todos os efeitos de atenuação envolvidos. Uma vez que

o “*yield* de fissão”³⁰ dos monitores de queima varia consideravelmente de acordo com o nuclídeo fissil, é necessária a avaliação da quantidade total de eventos de fissão devido ao ²³⁵U, ²³⁸U e ²³⁹Pu presentes no combustível nuclear irradiado (Terremoto et al., 2000). Na TAB. 2 são relacionados os nuclídeos mais indicados para uso como monitores de queima.

TABELA 2 - Nuclídeos mais indicados para uso como monitores de queima.

Histórico do EC [tempo]		Monitor de Queima
Irradiação	Estocagem	
< 40 d	> 9 d	¹⁴⁰ Ba/ ¹⁴⁰ La
< 200 d	> 40 d	⁹⁵ Zr
≥ 1000 d	< 2 a	¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr
> 1800 d	≥ 2 a	¹³⁷ Cs

Fonte: Reus e Westmeier (1983), Terremoto et al. (2000).

3.5.4. Medidas dimensionais do combustível irradiado

A estabilidade dimensional do combustível irradiado é um dos fatores que dão indicativo do seu bom desempenho sob irradiação. O acompanhamento da espessura de miniplacas ou de placas combustíveis após ciclos sucessivos de irradiação permite a avaliação do inchamento (*swelling*) da mesma. O inchamento do combustível é um dos fatores mais importantes durante a irradiação porque causa gradativa diminuição do volume do canal de refrigeração interferindo nas condições de transferência de calor gerado no processo de fissão.

Alguns exemplos de aplicações de medidas dimensionais na piscina são:

- (i) Medida de espessura de miniplacas ou placas combustíveis;
- (ii) Medida do comprimento do EC;
- (iii) Medidas dos canais de refrigeração, por meio de lâminas plásticas calibradas passa-não passa, ou empregando sondas especiais (LVDT).

3.6. Experiência alcançada na qualificação de combustíveis com baixa concentração de urânio produzidos no IPEN/CNEN-SP

O IPEN/CNEN-SP produziu nos últimos anos EC contendo dispersões de U₃O₈-Al (1,9 e 2,3 gU/cm³) e U₃Si₂-Al (3,0 gU/cm³) para suprir o reator IEA-R1. As

³⁰ O termo “*yield* de fissão” representa o rendimento da produção de um determinado radionuclídeo a partir da fissão do ²³⁵U.

queimas médias alcançadas pelos EC protótipos desses combustíveis são mostradas na TAB. 3.

TABELA 3 - Queimas alcançadas pelos EC protótipos dos combustíveis de U_3O_8 -Al com 1,9 e 2,3 gU/cm³ e de U_3Si_2 -Al com 3,0 gU/cm³ irradiados no reator IEA-R1.

Identificação EC	Material	Densidade de U no cerne (gU/cm ³)	Status	Queima média (% ²³⁵ U)	
				Calculada	Medida experimental
EC 130	U_3O_8 -Al	1,9	queimado	35,26 (*)	(36,8 + 5,1) (**)
EC 153	U_3O_8 -Al	2,3	queimado	34,16 (*)	Não realizada
ECC 169	U_3Si_2 -Al	3,0	queimado	43,58 (*)	Não realizada

Fontes - Tondin (2011), (*) Yamaguchi (1997) e (**) Terremoto et al. (2000).

Depois dos protótipos, outros EC contendo esses combustíveis foram fabricados e utilizados no núcleo do reator IEA-R1. As queimas médias alcançadas pelos EC contendo U_3O_8 -Al com concentrações de 1,9 e 2,3 gU/cm³ foram, respectivamente, da ordem de 30% e 35% de ²³⁵U. Para os EC contendo U_3Si_2 -Al com 3,0 gU/cm³, estas queimas têm sido da ordem de 45 a 50% de ²³⁵U (Tondin, 2011). Os resultados obtidos dos ensaios não destrutivos podem ser sumarizadas como:

- *Inspeções visuais dos EC:*
 - ✓ Nenhum aspecto não usual foi observado no histórico do acompanhamento da irradiação dos combustíveis. Não foram observadas distorções ou deformações excessivas dos EC;
 - ✓ Imagens tomadas da parte superior (topo) do EC mostraram que os canais de refrigeração se mostraram uniformes em geral, sem nenhuma observação de anormalidade;
 - ✓ As placas combustíveis apresentaram-se em condições gerais razoáveis, com padrões de oxidação (corrosão) uniformes sobre as respectivas áreas ativas, não tendo apresentado nenhuma ocorrência aparente de *blister*, inchamento incomum ou outros defeitos;
- *Sipping:* Foram identificados dois casos isolados de EC que apresentaram vazamento de produtos de fissão.
- *Medição de queima:* Foram realizadas medições experimentais para determinação da queima média ao longo de alguns EC irradiados, empregando

técnica de espectrometria de raios-gama. Os resultados medidos foram comparados com os calculados pela Divisão de Física de Reatores do CEN, tendo os resultados apresentado boa concordância (Yamaguchi, 1997), (Terremoto et al., 2000).

O emprego desses métodos não destrutivos pelo IPEN/CNEN-SP justificou-se principalmente devido às relativamente baixas concentrações de U utilizadas nos seus combustíveis iniciais, em relação às concentrações máximas já qualificadas internacionalmente para esses combustíveis.

Até setembro de 2011 foi fabricado na Instituição um total de 92 EC tipo placa para o reator IEA-R1³¹. Ocorreram dois casos isolados de falha de EC, o IEA-156 com $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ ($2,3 \text{ gU/cm}^3$) e o IEA-175, com $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($3,0 \text{ gU/cm}^3$). O primeiro EC (IEA-156) foi retirado da operação no mês de agosto/2001, após a confirmação de vazamento de produtos de fissão por meio de ensaio de *sipping*. Durante a inspeção visual desse EC (Silva et al., 2001), foi verificada (i) a existência de um risco longitudinal antigo (já coberto com camada de óxido) causado por manuseio, contendo alguns pontos pretos (pites) pequenos sobre o mesmo e, (ii) a saída momentânea de pequenas bolhas gasosas, provenientes de um dos canais de refrigeração entre duas placas combustíveis internas, não identificadas, no momento em que este EC foi trazido do núcleo até a posição de inspeção visual. Não foi feita a coleta das bolhas de gás para análise. Não foi possível identificar o local da falha. Este EC foi posteriormente transportado para os EUA em novembro/2007, dentro do escopo do programa de retorno aos EUA dos combustíveis nucleares de origem norte-americana. O segundo EC (IEA-175) ainda com baixa queima (7 % de at. de ^{235}U), teve sua irradiação interrompida ao final do primeiro semestre de 2008, ao apresentar vazamento de PF em testes de *sipping* realizados. Não foi possível identificar o local da falha. Este EC encontra-se atualmente armazenado na piscina do reator IEA-R1.

Por meio de medidas experimentais no núcleo do reator IEA-R1, empregando um EC instrumentado (EC IEA 208, com 18 placas combustíveis) fabricado no IPEN/CNEN-SP, pesquisadores do CEN constataram que as temperaturas das placas combustíveis internas são, em média, 5 °C menores que aquelas das placas combustíveis externas do EC³². Este fato confere representatividade às inspeções visuais dos EC irradiados, uma vez que as imagens obtidas das placas combustíveis externas representam

³¹ Conforme "Tabela de datas de montagem e entrega de EC de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ". Documento interno do Centro do Combustível Nuclear (CCN) do IPEN/CNEN-SP, em 11/10/2011.

³² Comunicação pessoal de Pedro Ernesto Umbehaun (CEN, IPEN/CNEN-SP) em 10/03/2011.

as condições menos favoráveis do EC, sendo, em princípio, considerado que as placas internas sempre estarão em melhores condições (sob o ponto de vista de corrosão) do que aquelas visualizadas nas placas combustíveis externas. Adicionalmente, verificou-se que as temperaturas medidas foram significativamente inferiores àquelas calculadas pelos códigos computacionais empregados nos cálculos termohidráulicos do núcleo, indicando que os fatores de incerteza considerados nos cálculos estão conservativos.

Não existem no IEA-R1 dados experimentais referentes à vazões de refrigerante nas folgas entre os EC do núcleo. As menores temperaturas nas placas combustíveis internas são devidas as maiores vazões de refrigerante através dos canais de refrigeração internos do EC em relação às existentes nas folgas entre EC vizinhos.

4. APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS NA PISCINA DO REATOR IEA-R1

4.1. *Proposta de aplicação de métodos não destrutivos para a qualificação de combustíveis tipo dispersão de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al de alta densidade de urânio no reator IEA-R1*

A proposta consiste em:

- i. especificar, fabricar e irradiar no IEA-R1 miniplacas combustíveis contendo dispersões de U_3O_8 -Al e U_3Si_2 -Al nas densidades de urânio máximas já qualificadas internacionalmente para estes combustíveis (3,2 e 4,8 gU/cm³, respectivamente);
- ii. monitorar as condições operacionais do reator (análises químicas da água, monitoração radiológica);
- iii. efetuar o acompanhamento das condições gerais das miniplacas ao longo da irradiação por meio de ensaios não destrutivos periódicos de inspeção visual e *sipping*, utilizando a infra-estrutura já existente no IEA-R1, acrescentando, no entanto, a aplicação de ensaio não destrutivo adicional, complementar, de medida de espessura das miniplacas, para avaliação do inchamento (*swelling*) do combustível, após ciclos sucessivos de irradiação das mesmas.
- iv. a partir da observação de bom desempenho sob irradiação das miniplacas, fabricar e irradiar EC parciais (contendo placas combustíveis externas de tamanho integral) e completos de U_3Si_2 -Al (4,8 gU/cm³), que poderão ser acompanhados periodicamente por meio de inspeções visuais e checados quanto ao vazamento de produtos de fissão por ensaios de *sipping*.

As análises dos resultados darão subsídios para avaliar e decidir a continuidade ou não da irradiação das miniplacas, até que sejam alcançadas as queimas almejadas para os testes de irradiação. A bancada para realização subaquática das medidas de espessura das miniplacas foi recentemente concluída e testada na piscina do reator IEA-R1. Os resultados de inchamento medidos serão comparados com valores obtidos na literatura (Hofman e Ryu, 1991; Suropto et al., 1994; Solís et al., 1998; ARPANSA, 2004; IAEA,

2009). Sendo observados comportamentos de irradiação das miniplacas combustíveis compatíveis com os apresentados na literatura, poderão ser fabricados e irradiados EC *full size* parciais e protótipos completos. A proposta inclui programa de acompanhamento das condições gerais das miniplacas irradiadas queimadas (após os testes de irradiação), durante o período de armazenamento das mesmas na piscina do IEA-R1.

As condições operacionais para a irradiação das miniplacas no reator IEA-R1 são densidades de potência máxima de 119 W/cm^3 , temperaturas máximas no revestimento de 81°C e velocidade de escoamento no canal de refrigeração do dispositivo de irradiação de miniplacas de $\sim 2 \text{ m/s}$. Estas condições operacionais para os testes de irradiação das miniplacas estão dentro do envelope de condições operacionais já amplamente testadas para os combustíveis a dispersão de $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ e $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, no âmbito do programa RERTR.

4.1.1. Critérios para a condução dos testes de irradiação, inspeções e medidas

1. As miniplacas combustíveis deverão ser irradiadas no reator IEA-R1, no interior de um dispositivo de irradiação. As miniplacas deverão ser facilmente removíveis deste dispositivo, para serem examinadas e avaliadas quanto ao seu estado geral por meio de inspeções visuais, testes de *sipping* e medições de espessura para avaliação do inchamento, durante os períodos de desligamento do reator;
2. A irradiação das miniplacas deverá ser conduzida até que estas alcancem queimas médias elevadas, da ordem de 80%, para demonstrar margens de segurança significativas sobre a queima média de descarregamento normalmente estipulada para o combustível (50% de queima da quantidade inicial de ^{235}U);
3. Não deve ocorrer vazamento de produtos de fissão durante a irradiação;
4. Não devem ser formados empolamentos durante a irradiação.

4.1.2. Frequência das inspeções visuais e medições de espessura

As inspeções visuais e medições de espessuras das miniplacas combustíveis na piscina do reator serão realizadas após cada período de queima de aproximadamente 5% da quantidade inicial de ^{235}U ou logo que possível, visando acompanhamento da evolução do inchamento. No capítulo 5 são estimados os tempos de irradiação necessários para alcançar as queimas de 50% e 80% da quantidade inicial de ^{235}U , para cada tipo de combustível.

A periodicidade das medidas de espessura e inspeções visuais das miniplacas combustíveis de testes dependerá do histórico de irradiação e da potência do reator. Testes de *sipping* das miniplacas combustíveis deverão ser conduzidos sempre que houver suspeita de vazamento de produtos de fissão na água do reator, durante os períodos de desligamento do reator ou a critério da chefia de operação do reator.

4.1.3. *Armazenamento de miniplacas irradiadas*

Após alcançarem as queimas planejadas, as miniplacas deverão ser armazenadas na piscina de estocagem de combustível irradiado do IEA-R1, no interior de um *rack* especial que possuirá a configuração similar ao estojo interno do dispositivo de irradiação proposto. Estas miniplacas deverão ser examinadas periodicamente para acompanhamento das suas condições gerais (aparência, corrosão, danos em geral), durante o período de armazenamento na piscina do IEA-R1. As atividades (em Ci) estimadas das miniplacas ao final do período previsto de irradiação são apresentadas no Capítulo 5. Em função destas atividades, deverão ser estudadas as alternativas para armazenamento das mesmas (continuar sob armazenamento molhado na piscina ou retirada da piscina do reator e armazenamento a seco em blindagens apropriadas).

4.1.4. *Procedimento em caso de falha*

Na eventualidade de ocorrência de vazamento de produtos de fissão em qualquer miniplaca de teste, confirmada por ensaio de *sipping*, a mesma deverá ser inspecionada visualmente, no intuito de identificar e quantificar as dimensões da perfuração no revestimento para correlacionar com a taxa de liberação de produtos de fissão determinada no ensaio de *sipping*. A miniplaca falhada deverá ser armazenada em um recipiente (tubulão) de alumínio, mantendo-a isolada da água da piscina. Nesse caso, a estagnação e falta de tratamento da água interna ao tubulão pode levar à aceleração da corrosão da miniplaca falhada. É recomendada a realização de tratamento periódico da água interna ao tubulão, por meio de sistema de resinas de troca iônica, para a retirada do ^{137}Cs . A miniplaca defeituosa deverá ser inspecionada periodicamente, dentro de períodos não superiores a 5 anos, para acompanhamento da evolução das dimensões e aparência do defeito no revestimento.

4.2. Infraestrutura disponível para irradiação e ensaios não destrutivos

4.2.1. Reator IEA-R1

O reator de pesquisas IEA-R1 possui projeto semelhante à grande parte dos reatores de pesquisa em operação no mundo. É do tipo piscina aberta, sendo moderado e refrigerado com água leve. A FIG. 8 mostra o reator IEA-R1, com destaque ao núcleo do reator em operação e ao efeito Cherenkov³³.

FIGURA 8 - Núcleo do reator IEA-R1, com destaque para o Efeito Cherenkov.

Fonte - IPEN

O reator utiliza tanto grafite revestida com Al quanto berílio como refletores de nêutrons. Foi projetado e construído pela empresa norte-americana Babcock & Wilcox, seguindo as especificações fornecidas pela Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos da América, dentro do programa “Átomos para a Paz” (Terremoto, 2004).

A montagem do núcleo do reator IEA-R1 é feita sobre uma espessa placa matriz de alumínio, que possui furos para posicionamento vertical dos componentes, segundo um arranjo retangular (8x10), mostrado na FIG. 9. A configuração do núcleo inclui um total de 24 elementos combustíveis dos quais 20 são do tipo padrão (EC) e 04 são especialmente projetados para permitir a inserção das barras de controle, sendo, por

³³ Luz azul oriunda da atividade nuclear do reator

este motivo, denominados elementos combustíveis de controle (ECC). Os combustíveis são posicionados na placa matriz segundo um arranjo (5x5).

FIGURA 9 - Posições dos componentes na placa matriz do reator IEA-R1.

Quando o reator IEA-R1 se encontra em operação à potência de 5 MW, o fluxo médio de nêutrons térmicos (energia cinética $\leq 0,625$ eV) no núcleo ativo totaliza $3,45 \times 10^{13}$ nêutrons/cm².s, enquanto o fluxo médio de nêutrons rápidos (energia cinética $> 0,625$ eV) totaliza $9,45 \times 10^{13}$ nêutrons/cm².s (Terremoto, 2004).

4.2.2. Infraestrutura para END

4.2.2.1. Inspeção visual

4.2.2.1.1. Equipamentos

Sistema para inspeção visual, composto por:

- Câmera subaquática, para imagens coloridas, marca Cyberia, modelo LEO, com baixa resistência à radiação (200 Gy), equipada com sistema de *zoom* óptico de 18X (mais *zoom* digital de 20X), módulo de controle e sistemas de iluminação e movimentação *pan and tilt*, com acionamentos e controles remotos;

- Haste de alumínio para suporte da câmera na piscina;
- Monitor de vídeo colorido marca JVC, modelo TM-H150CG, de 15 polegadas;
- Gravador de DVD com *Hard Disk* interno, marca Pioneer, modelo DVR550H-S.

Na FIG. 10 é mostrado o sistema para inspeção visual Cyberia, modelo LEO. A ligação dos equipamentos segue o esquema mostrado na FIG. 11.

FIGURA 10 - Sistema de inspeção visual Cyberia, modelo LEO.

FIGURA 11 - Esquema de ligação dos equipamentos do sistema de inspeção visual.

4.2.2.1.2. Procedimento e requisitos para inspeção visual de miniplaca irradiada

A câmera do sistema de inspeção visual deverá ser instalada a uma distância aproximada de 1,5 m da miniplaca. A câmera será mantida suspensa por uma haste de alumínio presa ao guarda-corpo da plataforma móvel da piscina, conforme mostra a FIG. 12.

Estando o reator desligado, o dispositivo de irradiação será retirado do núcleo e movimentado até um suporte que deverá estar montado ao lado da plataforma submersa existente na piscina do reator. O estojo que contém as miniplacas combustíveis deverá ser retirado do interior do dispositivo de irradiação. Cada miniplaca será retirada e inspecionada individualmente. O registro das ocorrências deverá ser feito na planilha de inspeção visual, mostrada na FIG. 13.

FIGURA 12 - Inspeção visual de miniplaca irradiada, na piscina do IEA-R1

As imagens das inspeções visuais deverão ser gravadas para proporcionar análises posteriores adicionais e registro efetivo das inspeções. Cada miniplaca combustível irradiada deve ser examinada e registrada como segue:

- ❖ O nível de ampliação da imagem deve ser adequado para visão, pelo menos do tamanho real da miniplaca. Examinar as duas faces. Os lados da miniplaca devem estar visíveis para constituir referência para o tamanho da imagem.
- ❖ Tomadas de imagens em perfil (espessura) da miniplaca, para identificar eventuais deformações ou arqueamento.

- ❖ Qualquer sinal de anormalidade ou dano sobre a área ativa (que contém combustível) deve ser inspecionado minuciosamente. A ampliação deve ser suficiente para visualizar um círculo de 3 mm de diâmetro, pelo menos, com aumento de 2X. Um marco de referência deve ser visível na imagem ou acrescentado após a gravação da imagem, para indicar o tamanho da ocorrência.
- ❖ Considerando as espessuras típicas do revestimento do combustível tipo placa de MTR (0,38 mm para os casos das placas combustíveis do EC do IEA-R1 e das miniplacas combustíveis de testes), a existência de nódulo de corrosão com diâmetro maior ou igual a 3 mm sobre o revestimento de placas combustíveis ou de miniplacas armazenadas na piscina pode constituir indício de perfuração do revestimento (Sindelar, 2002). A estanqueidade do revestimento deverá ser verificada através de ensaio de *sipping*.

Os resultados das inspeções deverão ser compilados num relatório de resultados dos exames visuais.

PLANILHA PARA INSPEÇÃO VISUAL DE MINIPLACA IRRADIADA	
IDENTIFICAÇÃO DA MINIPLACA: _____		DATA: ____/____/____ POR: _____	
<p style="text-align: center;">FACE 1</p> <p> ☐ Nenhuma Ocorrência Relevante ☐ Mancha de Oxidação </p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> ☐ Leve ☐ Moderada ☐ Intensa </div> </div>	OBSERVAÇÕES:	<p style="text-align: center;">FACE 2</p> <p> ☐ Nenhuma Ocorrência Relevante ☐ Mancha de Oxidação </p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> ☐ Leve ☐ Moderada ☐ Intensa </div> </div>	OBSERVAÇÕES:

FIGURA 13 - Planilha para inspeção visual de miniplaca combustível.

4.2.2.2. Ensaio de *sipping*

Ensaio de *sipping* deverão ser conduzidos individualmente para cada miniplaca. Considerando que existem menores quantidades de combustível numa miniplaca (~ 2 a 3 g de ^{235}U , dependendo do composto de urânio) em relação àquela presente em uma placa combustível de tamanho integral de EC (~ 15 g de ^{235}U), será utilizado um recipiente (tubo de *sipping*) com menor volume, para diminuir a diluição dos produtos de fissão e permitir com que as amostras de água possam ter concentrações do radionuclídeo monitor de queima em níveis mensuráveis. O tubo para *sipping* de miniplaca combustível na piscina do IEA-R1 possui comprimento de 146 cm, diâmetro externo de 13,97 cm, espessura da parede do tubo de 0,317 cm, com um volume interno aproximado de 20,3 litros.

4.2.2.2.1. Equipamentos

Os seguintes equipamentos fazem parte do sistema para *sipping* do IEA-R1:

- Blindagem de chumbo;
- Suporte para amostras;
- Fonte de calibração líquida de ^{137}Cs ;
- Detector de germânio hiperpuro (HPGe), marca EG&G/ORTEC, modelo GEM-25185-P-PLUS;
- Amplificador, modelo 973U, da EG&G/ORTEC;
- Fonte de alta tensão, modelo 659, da EG&G/ORTEC;
- BIN, 4001C, da EG&G/ORTEC;
- Analizador multicanal, modelo 921, da EG&G/ORTEC;
- Microcomputador compatível IBM;
- Programa para aquisição de espectros de raios-gama, MAESTRO II, da EG&G/ORTEC;
- Programa de análise para determinação do número de contagens (área) sob os fotopicos, GenieTM 2000.

4.2.2.2.2. Metodologia e procedimento

O procedimento para o ensaio de *sipping* de uma miniplaca irradiada consiste, basicamente, no armazenamento da miniplaca suspeita de apresentar vazamento, no interior de um tubo fechado em sua extremidade inferior, denominado aqui como “recipiente de *sipping*”, contendo água desmineralizada. Para a introdução da miniplaca no recipiente de *sipping*, esta deverá estar presa a um arame de alumínio, o qual permitirá a retirada da mesma do interior do recipiente, após a realização do ensaio. Após uma

homogeneização inicial, é coletada a primeira amostra de água, caracterizada como amostra de radiação de fundo (BG). Após um tempo de repouso de quatro horas, ar comprimido é injetado para promover uma melhor homogeneização da água. A segunda amostra de água é coletada do interior do tubo de *sipping* e caracterizada como “amostra de *sipping* da miniplaca em teste”. Na FIG. 14 encontram-se ilustradas as etapas principais do ensaio de *sipping*.

FIGURA 14 - Etapas do ensaio de *sipping* de miniplaca irradiada.
(A) carregamento da miniplaca no tubo de *sipping*; (B) repouso.

Dados adicionais coletados são: temperatura da água do interior do tubulão de *sipping*, horário da coleta da amostra e a potência de operação do reator durante os testes de *sipping*, assim como as características da água desmineralizada usada na lavagem do tubulão (pH, condutividade, cloretos). Medições de espectrometria gama são feitas sobre as amostras coletadas. A presença de produtos de fissão nas amostras indica a existência de defeito no revestimento da miniplaca. Uma descrição detalhada da metodologia empregada nos testes de *sipping* realizados no reator IEA-R1 é apresentada no trabalho de Zeituni et al. (2004).

4.2.2.3. Medida de queima por espectrometria de raios-gama

O aparato experimental para ensaios de espectrometria de raios-gama, disponível no reator IEA-R1, foi desenvolvido para a determinação da queima média de EC completos (com 18 placas combustíveis) irradiados. O embasamento teórico, os equipamentos, a metodologia de cálculo assim como a descrição completa do procedimento experimental para a medida de queima absoluta dos EC irradiados no IEA-R1, empregando espectrometria de raios-gama, são apresentados de maneira detalhada em publicação de Terremoto et al. (2000). Atualmente, esta técnica de medição de queima absoluta dos EC irradiados no reator IEA-R1 deixou de ser empregada com frequência, uma vez que os cálculos de queima efetuados por programas de Física de Reatores conseguem reproduzir com boa concordância os valores experimentais.

Para realizar espectrometria de raios-gama em miniplaca combustível irradiada no IEA-R1, há que se proceder revisão da metodologia de análise dos dados experimentais e adaptação/modificação de componentes (colimador, suportes, etc.) do sistema.

4.2.3. Miniplacas combustíveis para os testes de irradiação

As miniplacas de testes foram fabricadas no IPEN/CNEN-SP segundo a técnica de *picture-frame*. Briquetes são produzidos por meio da compactação dos pós de U_3O_8 ou U_3Si_2 , misturados em proporções pré-determinadas com pó de Al. O briquete é envolvido por uma moldura e por duas placas de revestimento, sendo este conjunto soldado em sua borda e, em seguida, aquecido em forno para laminação a quente (500 a 580 °C). Após a laminação, as miniplacas são testadas para verificar a qualidade da ligação metalúrgica entre cerne e revestimento, através do teste de empolamento³⁴. O ajuste final da espessura da miniplaca é feito por meio de um passe de laminação a frio. O comprimento do cerne de cada miniplaca combustível é verificado por meio de análise radiográfica, garantindo-se o atendimento da especificação dimensional. Em seguida, as miniplacas combustíveis são pré-cortadas, visando facilitar o manuseio posterior nas operações de aplainamento, radiografias, traçagem e corte final. Finalizadas, as miniplacas são encaminhadas para análise dimensional (IPEN, 2011).

³⁴ O teste de empolamento é realizado para verificar a integridade da união metalúrgica entre o cerne e o revestimento. Após os passes de laminação a quente, antes do último passe de laminação (a frio), a miniplaca combustível é submetida a um aquecimento a 500 °C, por um tempo de 1 hora. Miniplacas que apresentem bolhas na região do cerne deverão ser rejeitadas. Na região fora do cerne são permitidas bolhas de diâmetro menor que 3 milímetros (IPEN, 2011).

Nas FIG. 15 e 16 são mostradas, respectivamente, a microestrutura do cerne de uma miniplaca contendo a dispersão de U_3Si_2-Al com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ e uma radiografia de raios-X tirada de uma miniplaca pronta fabricada no CCN do IPEN/CNEN-SP.

FIGURA 15 - Microestrutura típica de uma miniplaca combustível de U_3Si_2-Al , ($4,8 \text{ gU/cm}^3$), não-irradiada, produzida no IPEN/CNEN-SP.
(Silva et al., 2009b)

FIGURA 16 - Radiografia de raios-X tirada de uma miniplaca combustível pronta.
(Silva et al., 2009b)

As especificações técnicas para a fabricação das miniplacas combustíveis de testes (Perrotta, 1999) foram adotadas com base em documentos publicados pela IAEA (IAEA, 1986, 1992, 2009), visando obter bom desempenho sob irradiação. Algumas das especificações adotadas são:

- Massa específica de urânio na miniplaca

Adotados os valores limites máximos de concentração de urânio já qualificados pelo RERTR (IAEA, 2009):

- a) para o U_3O_8-Al : $3,2 \text{ gU/cm}^3$, correspondente a 45% em volume de U_3O_8 no cerne;
- b) para o U_3Si_2-Al : $4,8 \text{ gU/cm}^3$, correspondente a 42,5% em volume de U_3Si_2 no cerne.

- Porosidade

A porosidade existente no cerne da miniplaca combustível acomoda os produtos de fissão gerados ao longo da queima, amenizando desta forma o inchamento da mesma

durante a irradiação. Este parâmetro é dependente do processo de fabricação utilizado e da porcentagem em volume de combustível no cerne.

- a) para o U_3O_8 -Al, faixa de 8 a 12% em volume (IAEA, 1992);
- b) para o U_3Si_2 -Al, faixa de 4 a 10% em volume (Snelgrove et al., 1987; IAEA, 1992).

- Tamanho das partículas dos pós combustíveis e de Al do briquete

Os tamanhos especificados das partículas dos pós combustíveis e de Al, empregados na fabricação dos briquetes para as miniplacas, são:

- Pó de U_3O_8 : entre 89 μm e 44 μm , com um máximo de 20% em massa de partículas menores que 44 μm e,
- Pó de U_3Si_2 : entre 150 μm e 44 μm , com um máximo de 20% em massa de partículas menores que 44 μm ,.
- Pó de Al: As partículas devem ser esféricas com tamanho menor que 44 μm .

- Espessura mínima do revestimento

Este parâmetro é especificado para garantir a não liberação de produtos de fissão para o refrigerante, especialmente após a perda de parcela da espessura do revestimento por corrosão³⁵.

Para as miniplacas combustíveis de testes, são especificados valores de espessuras mínimas do revestimento para as zonas 1 e 2, que são, respectivamente, as zonas central e de extremidades do cerne (*dog bone*), conforme indicação na FIG. 17. As espessuras mínimas do revestimento para as zonas 1 e 2 devem ser 0,3 mm e 0,25 mm, respectivamente.

- Material da moldura e revestimento : alumínio Al 6061-T0, que possui a seguinte composição química nominal (% em peso): Cu (0,15-0,4) + Si (0,4-0,8) + Fe (<0,7) + Mn (<0,15) + Mg (0,8-1,2) + Zn (<0,25) + Cr (0,04-0,35) + Ti (<0,15) + Al (balanço) (IPEN, 2011).

³⁵ Historicamente, a espessura do revestimento de placas combustíveis de MTR tem sido especificada como $0,38 \pm 0,08$ mm na maioria dos casos. Com o uso de maiores frações em volume de combustível no cerne, fica dificultado o escoamento dessas partículas em meio à matriz metálica, durante a laminação a quente, o que leva à tendência de que um número expressivo de partículas combustíveis violem a mínima espessura do revestimento de 0,30 mm. Para reduzir a taxa de rejeição e o custo de fabricação, placas combustíveis foram aceitas com espessuras de revestimento de 0,25 mm e até 0,20 mm como no caso do reator HFIR (*High Flux Isotope Reactor*), situado no ORNL (Simões, 1993). A espessura mínima aceitável está fortemente relacionada ao tempo esperado de irradiação das placas combustíveis no reator, aos materiais usados e às técnicas de fabricação. Entretanto, liberações de produtos de fissão devido à corrosão por pite foram encontradas no passado, mesmo em casos onde a mínima espessura do revestimento era 0,30 mm (IAEA, 1992; Simões, 1993).

- Dimensões nominais da miniplaca: 170 mm x 52 mm x 1,52 mm. Detalhes adicionais apresentados na FIG. 17.

FIGURA 17 - Dimensões da miniplaca combustível.

- Identificação da miniplaca

A identificação de cada miniplaca é composta de dois conjuntos de caracteres alfanuméricos com o seguinte significado:

1º. conjunto: constituído de cinco caracteres alfanuméricos, sendo dois para identificar o tipo de combustível: Ox (para U_3O_8 -Al) ou Si (para U_3Si_2 -Al), seguido de um terceiro caractere alfabético, significando: N (U Natural) ou E (U Enriquecido), seguido de dois caracteres numéricos para designar o sequencial da miniplaca dentro do tipo e densidade do combustível.

2º. conjunto: constituído de três caracteres numéricos para representar a densidade de urânio presente na dispersão.

4.3. Desenvolvimento de infraestrutura para irradiação e medição de espessura de miniplacas

Atividades de desenvolvimento de infraestrutura para irradiação de miniplacas realizadas neste trabalho incluíram: (i) projeto e fabricação de um dispositivo para irradiação de miniplacas (DIM); (ii) montagem, testes de funcionalidade e comissionamento de uma bancada para medições dimensionais subaquáticas de miniplacas combustíveis irradiadas; (iii) fabricação de um *rack* para armazenamento provisório do DIM junto à bancada de medidas dimensionais na piscina; (iv) fabricação de um recipiente para o teste de *sipping* de miniplaca e (v) fabricação de ferramenta para manuseio remoto de miniplaca irradiada.

4.3.1. Dispositivo para irradiação de miniplacas - DIM

Para proceder os testes de irradiação, foi fabricado na Instituição um dispositivo de irradiação de miniplacas (DIM) com capacidade para irradiar simultaneamente até 10 miniplacas combustíveis e permitir que as mesmas possam ser retiradas periodicamente para avaliação do seu desempenho sob irradiação. A seção transversal do DIM é mostrada na FIG. 18. Os componentes do DIM são mostrados na FIG. 19 e constituem-se de: tubo, estojo, grelha, placa limitadora de vazão (PLV), bocal de extremidade e parafusos. Durante a irradiação no núcleo do reator, o estojo que contém as miniplacas combustíveis fica apoiado sobre a grelha. A grelha elimina qualquer possibilidade de queda de miniplacas pelo bocal inferior, dando maior grau de segurança para o experimento. A configuração final e detalhes geométricos e dimensionais do DIM montado na placa matriz do IEA-R1 são mostrados na FIG. 20.

FIGURA 18 - Seção transversal do DIM.

FIGURA 19 - Vista geral dos componentes do DIM.

O comportamento termohidráulico do dispositivo de irradiação de miniplacas (DIM) foi avaliado por meio de experimentos termohidráulicos realizados no CEN. Os experimentos conduziram à colocação de uma placa limitadora de vazão (PLV) no interior do DIM, a qual limita a vazão neste dispositivo em $13 \text{ m}^3/\text{h}$ (Torres, Umbehaun e Andrade, 2002). Cálculos neutrônicos, termohidráulicos e de avaliação de segurança para a inserção do DIM no núcleo do reator IEA-R1 foram realizados por Domingos (2010).

4.3.1.1. Avaliação neutrônica

A influência da inserção do DIM contendo dez miniplacas combustíveis de alta densidade de urânio nos parâmetros de operação do reator foi analisada por Domingos (2010), empregando metodologia de cálculo neutrônico desenvolvida no Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do IPEN/CNEN-SP. Os materiais que compõem o DIM e o núcleo do reator IEA-R1 foram modelados e estudados utilizando os programas computacionais HAMMER-TECHNION (Barhen, Rhotenstein e Taviv, 1978) para a geração das seções de choque e TWODB (Little e Hardie, 1969; Yamaguchi, 1997) para o cálculo do núcleo do reator e cálculo da queima dos combustíveis, em duas dimensões. Foram verificadas as mudanças nos parâmetros neutrônicos do reator IEA-R1 com a introdução do DIM, em três diferentes posições da placa matriz (26, 36 e 37). A posição 36 foi selecionada por apresentar maior densidade de potência entre as consideradas. Para o cálculo tridimensional do núcleo, empregando o programa CITATION (Fowler, Vondy e Cunningham, 1972), as regiões modeladas foram dispostas em uma geometria segundo um sistema de eixos coordenados x - y - z , sendo cada eixo dividido em malhas, de maneira que:

- *Eixo x*, a dimensão que corresponde à largura da placa matriz, de 109,7 cm, foi dividida em 128 malhas;
- *Eixo y*, a dimensão que corresponde ao comprimento da placa matriz de 129,0 cm, foi dividida em 148 malhas; e
- *Eixo z*, a dimensão que corresponde à altura de 122,74 cm (referente aos combustíveis do núcleo e irradiador de miniplacas apoiados na placa matriz, mais um camada de água), foi dividido em 82 malhas.

A origem dos eixos x - y - z ficou posicionada num plano situado 18,14 cm acima da extremidade superior do DIM. A cota 122,74 cm corresponde à extremidade inferior do bocal do DIM, encaixado na placa matriz do reator (orientação do eixo z é descendente). A

linha de centro do núcleo corresponde à cota 65,54 cm e as extremidades superior e inferior do comprimento ativo das miniplacas nas cotas 59,64 e 71,44 cm, respectivamente.

As densidades de potência e os fluxos de nêutrons rápidos e térmicos no interior do DIM, calculados pelo CITATION, referentes à posição 36, considerando o caso de maior reatividade de irradiação de dez miniplacas de U_3Si_2-Al com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ e operação do reator em 120 horas semanais a 5,0 MW, estão relacionados na TAB. 4.

Na TAB. 4 pode-se notar que os valores de densidade de potência só são encontrados entre as alturas 60,23 e 70,85 cm (referentes às malhas 38 e 47, em negrito) em relação ao ponto de origem do eixo z. A densidade de potência máxima é de 119 W/cm^3 e os máximos fluxos de nêutrons rápidos e térmicos são, respectivamente, $7,08 \times 10^{13}$ e $3,61 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$. Os resultados variam de acordo com o posicionamento das miniplacas no DIM. Os posicionamentos do cerne da miniplaca em relação às malhas (eixo z) consideradas na modelagem com o CITATION estão indicados na FIG. 21.

FIGURA 21 - Posicionamentos das malhas (eixo z) nas miniplacas em relação à modelagem do núcleo com o CITATION.

TABELA 4 - Parâmetros gerados com o CITATION para o DIM com 10 miniplacas de U_3Si_2-Al com $4,8 \text{ gU/cm}^3$, na posição 36 (5,0 MW).

Malha	Altura Z (cm)	Densidade de Potência (W/cm^3)	Fluxo de nêutrons (Grupo 1 - Rápidos)	Fluxo de nêutrons (Grupo 2 - Térmicos)
1	1,00000	0,00000E+00	1,15000E+11	2,42000E+11
2	3,00000	0,00000E+00	1,94000E+11	5,84000E+11
3	5,00000	0,00000E+00	2,97000E+11	9,70000E+11
4	7,00000	0,00000E+00	4,38000E+11	1,46000E+12
5	9,00000	0,00000E+00	6,35000E+11	2,12000E+12
6	11,00000	0,00000E+00	9,15000E+11	3,02000E+12
7	13,00000	0,00000E+00	1,31000E+12	4,27000E+12
8	15,00000	0,00000E+00	1,88000E+12	5,98000E+12
9	17,00000	0,00000E+00	2,71000E+12	8,28000E+12
10	19,00000	0,00000E+00	3,89000E+12	1,13000E+13
11	21,00000	0,00000E+00	5,58000E+12	1,49000E+13
12	23,00000	0,00000E+00	7,99000E+12	1,89000E+13
13	24,85670	0,00000E+00	1,10000E+13	2,19000E+13
14	26,57000	0,00000E+00	1,42000E+13	2,43000E+13
15	28,28330	0,00000E+00	1,79000E+13	2,62000E+13
16	29,83750	0,00000E+00	2,16000E+13	2,77000E+13
17	31,23250	0,00000E+00	2,48000E+13	2,93000E+13
18	32,62750	0,00000E+00	2,79000E+13	3,13000E+13
19	34,02250	0,00000E+00	3,07000E+13	3,36000E+13
20	35,41750	0,00000E+00	3,33000E+13	3,59000E+13
21	36,81250	0,00000E+00	3,58000E+13	3,82000E+13
22	38,20750	0,00000E+00	3,81000E+13	4,04000E+13
23	39,60250	0,00000E+00	4,03000E+13	4,26000E+13
24	40,99750	0,00000E+00	4,24000E+13	4,47000E+13
25	42,39250	0,00000E+00	4,44000E+13	4,67000E+13
26	43,78750	0,00000E+00	4,62000E+13	4,85000E+13
27	45,18250	0,00000E+00	4,79000E+13	5,02000E+13
28	46,57750	0,00000E+00	4,95000E+13	5,18000E+13
29	47,97250	0,00000E+00	5,10000E+13	5,33000E+13
30	49,36750	0,00000E+00	5,25000E+13	5,45000E+13
31	50,76250	0,00000E+00	5,38000E+13	5,55000E+13
32	52,15750	0,00000E+00	5,52000E+13	5,62000E+13
33	53,55250	0,00000E+00	5,66000E+13	5,61000E+13
34	54,94750	0,00000E+00	5,82000E+13	5,45000E+13
35	56,34250	0,00000E+00	6,04000E+13	4,98000E+13
36	57,69000	0,00000E+00	6,34000E+13	4,12000E+13
37	58,99000	0,00000E+00	6,57000E+13	3,71000E+13
38	60,23000	1,19000E+02	6,90000E+13	3,11000E+13
39	61,41000	1,12000E+02	7,03000E+13	2,90000E+13
40	62,59000	1,08000E+02	7,08000E+13	2,80000E+13
41	63,77000	1,06000E+02	7,08000E+13	2,74000E+13
42	64,95000	1,04000E+02	7,04000E+13	2,70000E+13
43	66,13000	1,03000E+02	6,98000E+13	2,67000E+13
44	67,31000	1,03000E+02	6,88000E+13	2,65000E+13
45	68,49000	1,03000E+02	6,75000E+13	2,66000E+13
46	69,67000	1,04000E+02	6,58000E+13	2,70000E+13
47	70,85000	1,09000E+02	6,34000E+13	2,84000E+13
48	72,09000	0,00000E+00	5,92000E+13	3,31000E+13
49	73,39000	0,00000E+00	5,59000E+13	3,61000E+13

(continua na próxima página . . .)

50	74,84000	0,00000E+00	5,16000E+13	4,30000E+13
51	76,44000	0,00000E+00	4,79000E+13	4,55000E+13
52	78,04000	0,00000E+00	4,48000E+13	4,49000E+13
53	79,64000	0,00000E+00	4,19000E+13	4,31000E+13
54	81,24000	0,00000E+00	3,90000E+13	4,08000E+13
55	82,84000	0,00000E+00	3,61000E+13	3,82000E+13
56	84,44000	0,00000E+00	3,32000E+13	3,55000E+13
57	86,04000	0,00000E+00	3,01000E+13	3,28000E+13
58	87,64000	0,00000E+00	2,70000E+13	3,01000E+13
59	89,24000	0,00000E+00	2,36000E+13	2,76000E+13
60	90,84000	0,00000E+00	2,01000E+13	2,56000E+13
61	92,27330	0,00000E+00	1,69000E+13	2,40000E+13
62	93,54000	0,00000E+00	1,43000E+13	2,25000E+13
63	94,80670	0,00000E+00	1,20000E+13	2,05000E+13
64	95,95670	0,00000E+00	1,02000E+13	1,82000E+13
65	96,99000	0,00000E+00	8,80000E+12	1,56000E+13
66	98,02330	0,00000E+00	7,69000E+12	1,27000E+13
67	99,25000	0,00000E+00	6,80000E+12	1,01000E+13
68	100,67000	0,00000E+00	5,96000E+12	8,66000E+12
69	102,09000	0,00000E+00	5,20000E+12	7,46000E+12
70	103,51000	0,00000E+00	4,51000E+12	6,44000E+12
71	104,93000	0,00000E+00	3,91000E+12	5,58000E+12
72	106,35000	0,00000E+00	3,36000E+12	4,88000E+12
73	107,77000	0,00000E+00	2,88000E+12	4,29000E+12
74	109,19000	0,00000E+00	2,44000E+12	3,83000E+12
75	110,61000	0,00000E+00	2,05000E+12	3,48000E+12
76	112,03000	0,00000E+00	1,69000E+12	3,24000E+12
77	113,57330	0,00000E+00	1,27000E+12	2,91000E+12
78	115,24000	0,00000E+00	8,99000E+11	2,31000E+12
79	116,90670	0,00000E+00	6,31000E+11	1,74000E+12
80	118,57330	0,00000E+00	4,36000E+11	1,23000E+12
81	120,24000	0,00000E+00	2,91000E+11	7,73000E+11
82	121,90670	0,00000E+00	1,81000E+11	3,33000E+11

De acordo com os estudos realizados por Domingos (2010), a reatividade inserida pela colocação do DIM é pequena e inferior ao máximo admitido para experimentos. Se for necessária a interrupção da irradiação para retirada do DIM, o reator deverá ser desligado e o DIM deverá ser transferido para qualquer posição livre dos *racks* de estocagem de elementos combustíveis da piscina. A posição 36 da placa matriz ocupada pelo DIM será preenchida com um elemento refletor de grafite e a operação do reator poderá ser retomada na mesma potência que o reator vinha operando. A inserção de reatividade no reator, calculada no CEN pela troca do DIM por um elemento refletor de grafite, para a configuração 246 é de +187 pcm, valor inferior ao limite admitido para experimentos (< 1000 pcm) no capítulo 16 do RAS (Relatório de Análise de Segurança) do IEA-R1 (IPEN, 1998).

4.3.1.2. Avaliação termohidráulica

A avaliação termohidráulica da introdução do DIM na placa matriz do reator IEA-R1 foi feita por Domingos (2010), quando foram analisadas as temperaturas máximas na miniplaca combustível através do programa MTRCR-IEA-R1 (Umbehaun, 2000). Foram determinadas as temperaturas máximas nas miniplacas combustíveis em função da vazão de refrigerante, mostradas no gráfico da FIG. 22. Foi determinada a vazão mínima necessária para não se atingir 95 °C (que é a temperatura para qual a probabilidade de corrosão no revestimento aumenta) igual a 9 m³/h. Nos cálculos foram consideradas 10 miniplacas combustíveis usando U₃Si₂-Al com 4,8 gU/cm³ (condição conservativa em relação às atualmente carregadas no DIM). Os cálculos demonstraram que todos os critérios de projeto foram atendidos. Foi introduzida no projeto do DIM uma placa limitadora de vazão (PLV) para regular a vazão em 13 m³/h para a refrigeração das miniplacas no interior do DIM (1,8% da vazão total fornecida pela bomba ao núcleo), sendo mantida a vazão média por EC do núcleo constante de ~24 m³/h (Torres et al., 2002; Domingos, 2010).

FIGURA 22 - Temperaturas nas miniplacas do DIM em função da vazão, na posição 36.

Da FIG. 22, pode ser visto que para a vazão de 13 m³/h estabelecida pela PLV, a temperatura máxima para o revestimento da miniplaca combustível, para a condição de operação do reator a 5,0 MW, será de 81 °C, inferior portanto ao limite estabelecido de 95 °C. Domingos (2010) verificou que, com relação ao APR (Acidente de Perda de Refrigeração), a refrigeração do DIM poderá ser feita apenas pelo ar na piscina.

4.3.2. Sistema de medida de espessura de miniplacas combustíveis - SMEMC

Foi construído no IPEN/CNEN-SP, dentro do escopo do Projeto BRA/4/047 da IAEA, um sistema para medidas subaquáticas de espessura de miniplacas, para a avaliação do inchamento (*swelling*) das miniplacas combustíveis irradiadas. As medidas de espessura das miniplacas são realizadas por meio de dois sensores LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) que são montados alinhados, um em frente ao outro. Um sensor LVDT similar ao utilizado no SMEMC é ilustrado na FIG. 23.

FIGURA 23 - Sensor LVDT.

A medida do deslocamento linear do apalpador é efetuada através da variação de tensão resultante da mudança na relutância magnética entre duas ou mais bobinas. Nos sensores LVDT, três enrolamentos simetricamente espaçados e um núcleo magnético móvel formam o sistema de acoplamento magnético. A mudança da posição do núcleo é detectada eletronicamente e o sinal é processado para a geração de uma leitura precisa do deslocamento aplicado.

4.3.2.1. Características construtivas e equipamentos

Algumas das características operacionais dos sensores TESA GTL 222 são relacionadas (TESA, 2011):

- faixa de atuação do apalpador: $\pm 1,5$ mm
- pressão pneumática nominal / máxima do sistema de atuação (bar): 0,25 / 6,0
- precisão (mm): 0,015
- temperatura de operação (°C): -10 a 65
- material da vedação flexível para as pontas apalpadoras: Viton®³⁶

³⁶ DuPont™ Viton® oferece uma excepcional resistência a altas temperaturas, aliada a uma ampla resistência química. Suas propriedades dinâmicas proporcionam extraordinário desempenho e maior longevidade em vedações e peças críticas, mesmo em ambientes agressivos.

<http://www.dupontelastomers.com/literature/viton/DA0A58836ADF554B8525747800655FE9.pdf>

Os sensores LVDT são instalados em uma bancada metálica, que por sua vez é montada na borda da piscina do reator IEA-R1. Os componentes estruturais da bancada são construídos em alumínio ou aço inoxidável. O sistema permite realizar medições de espessuras de uma miniplaca combustível. A miniplaca irradiada é colocada na posição de medição e presa por um dispositivo de fixação, o qual é acionado por um cabo de aço. Os sensores lineares são montados na extremidade inferior de uma coluna metálica móvel e são acionados pneumaticamente. A coluna metálica móvel que suporta os sensores é suportada por uma mesa de coordenadas X-Y, que é acionada manualmente.

Os equipamentos eletrônicos e componentes mecânicos que compõem a bancada do SSMC são apresentados na TAB. 5.

TABELA 5 - Equipamentos da bancada do SSMC.

<i>Item</i>	<i>Especificação</i>	<i>Quantidade</i>	<i>No. Ref.</i>
<i>Instrumentos eletrônicos (Brown & Sharpe – TESA, Suíça)</i>			
1	Sensor eletrônico GTL-222 com 4 metros de cabo para operação subaquática.	4	32.30054
2	Cabo de extensão com 2 metros	4	32.40202
3	Instrumento eletrônico de medida de deslocamento - Tesatronic TT60 (110V)	1	44.30010
4	Bomba eletropneumática FMC (110V)	1	32.60486
5	Pedal para acionamento da bomba eletropneumática	1	47.68001
6	Cabo especial RS232	1	47.61046
7	Conector especial para RS232	1	SP47.
8	Bloco padrão de calibração de 1,0 mm	1	Aço-Classe 0
9	Bloco padrão de calibração de 1,5 mm	1	Aço-Classe 0
10	Bloco padrão de calibração de 2,0 mm	1	Aço-Classe 0
11	Bloco padrão de calibração de 4,0 mm	1	Aço-Classe 0
12	Cabeça para bitola TN11	2	35.10101
13	Cabeça para bitolas TN12	2	35.10201
14	Vedação de Viton para GTL-222	8	32.60489
<i>Componentes mecânicos</i>			
15	Mesa X-Y-Z para movimentação dos sensores	1	(*)
16	Estrutura metálica da bancada em aço inoxidável	1	(*)
17	Dispositivo de irradiação de miniplacas (DIM)	1	
18	Estrutura suporte para o DIM	1	
19	Ferramenta de manuseio de miniplaca combustível	1	

(*) Fabricados dentro do escopo do Projeto BRA/4/047 da IAEA.

4.3.2.2. Instalação das sondas na bancada

A montagem das duas sondas na bancada do SMEMC deve ser feita de maneira que uma fique posicionada defronte à outra, mantendo uma distância de 4,5 mm entre as suas pontas apalpadoras. Esta distância considera a espessura nominal da miniplaca (1,52 mm) mais dois percursos de aproximadamente 1,5 mm dos apalpadores durante a realização da medição. Desta maneira a movimentação da coluna suporte das sondas se dá mantendo as extremidades das sondas distantes 1,5 mm das respectivas superfícies da miniplaca. A atuação das pontas apalpadoras é feita por meio de acionamento pneumático e os resultados das medidas são obtidos por meio da seleção do modo (-A+B) no Módulo Tesatronic TT60. Concluída a montagem, é feita a medida de um bloco padrão e de uma miniplaca *dummy* de referência, para aferir a resposta do equipamento.

Deve-se ressaltar que durante as medições de espessura da miniplaca combustível, qualquer movimentação da coluna móvel suporte das sondas para o posicionamento das mesmas sobre os pontos a serem medidos deve ser feita com muita cautela, evitando movimentos bruscos na bancada que possam causar oscilações na extremidade da coluna que contém as sondas, para evitar choques indevidos das mesmas com o revestimento da miniplaca em exame.

4.3.2.3. Comissionamento do equipamento

Para comissionamento do SMEMC foram realizados dois conjuntos de medições, fora e dentro da piscina do reator, utilizando duas miniplacas *dummy* de alumínio, de diferentes larguras e espessuras (Silva e Domingos, 2009). A primeira miniplaca, com 170 mm de altura, 50 mm de largura e 1,52 mm de espessura, foi utilizada nas medições realizadas fora da piscina e a segunda, com 170 mm de altura, 52 mm de largura e 1,41 mm de espessura, foi utilizada nas medições dentro da piscina do reator IEA-R1.

O aparato experimental foi montado inicialmente fora da piscina e o seu desempenho foi testado. Foram feitos ajustes de componentes mecânicos da bancada. O módulo eletrônico de medidas TESA TT60 oferece quatro diferentes modos de leitura disponíveis, que foram avaliados. Para qualquer dos modos de medição, somente são mudadas as operações para se chegar nos mesmos resultados. Assim, foi adotado por convenção, como modo de leitura padrão para as medições das miniplacas, o modo (-A+B).

Foram feitas medições das espessuras de uma miniplaca *dummy* usando inicialmente um micrômetro (marca Mitutoyo, 0-25 mm, precisão de 0,01mm, calibrado) e em seguida os sensores do SMEMC, para comparação dos resultados. As FIG. 24 e 25 mostram a utilização do micrômetro e as FIG. 26 e 27 a utilização dos sensores do SMEMC para a medida de espessura de uma miniplaca *dummy*. As coordenadas dos pontos medidos foram fixadas em relação ao canto inferior esquerdo da miniplaca de teste. Os resultados das medições estão apresentados na TAB. 6.

FIGURA 24 - Medição de espessura da miniplaca *dummy* com micrômetro.

FIGURA 25 - Medição de espessura da miniplaca *dummy* com micrômetro (vista lateral).

FIGURA 26 - Medição de espessura de miniplaca *dummy* com sensores do SMEMC.

FIGURA 27 - Medição de espessura de miniplaca *dummy* com sensores do SMEMC.

TABELA 6 - Medidas de espessura de miniplaca *dummy* obtidas durante medições realizadas fora da piscina, para o comissionamento do SMEMC.

Eixo X (mm)	Eixo Y (mm)	Micrômetro Espessura (mm)	SMEMC Espessura (mm)	Diferença (mm)
35,00	5,00	1,52	1,521	0,001
35,00	15,00	1,53	1,530	0,000
35,00	25,00	1,54	1,534	-0,006
35,00	35,00	1,54	1,529	-0,011
35,00	45,00	1,53	1,521	-0,009
55,00	5,00	1,52	1,522	0,002
55,00	15,00	1,53	1,532	0,002
55,00	25,00	1,53	1,537	0,007
55,00	35,00	1,54	1,534	-0,006
55,00	45,00	1,53	1,524	-0,006
85,00	5,00	1,52	1,522	0,002
85,00	15,00	1,52	1,533	0,013
85,00	25,00	1,53	1,536	0,006
85,00	35,00	1,52	1,532	0,012
85,00	45,00	1,52	1,521	0,001
115,00	5,00	1,52	1,522	0,002
115,00	15,00	1,53	1,533	0,003
115,00	25,00	1,53	1,535	0,005
115,00	35,00	1,53	1,530	0,000
115,00	45,00	1,52	1,520	0,000
135,00	5,00	1,52	1,522	0,002
135,00	15,00	1,53	1,534	0,004
135,00	25,00	1,53	1,534	0,004
135,00	35,00	1,53	1,531	0,001
135,00	45,00	1,52	1,520	0,000

Da TAB. 6, pode ser visto que os resultados obtidos pelo dispositivo eletrônico de medidas apresentaram boa concordância com aqueles obtidos com o micrômetro. Posteriormente, o sistema foi introduzido na piscina para a realização de medidas na condição submersa. Foram realizados cinco conjuntos de medições utilizando uma miniplaca *dummy*. As medições foram feitas sobre nove pontos da miniplaca localizados nas ordenadas (eixo X) 10 mm, 26 mm e 42 mm e abscissas (eixo Y) 22 mm, 85 mm e 145 mm.

Dos cinco conjuntos de medições realizadas, três foram realizados em sequência, ou seja, retirando-se apenas a miniplaca da morsa entre uma medição e outra. Após a realização do terceiro conjunto de medições, todo o equipamento foi desmontado e retirado da piscina, sendo em seguida, reinstalado no mesmo local, para avaliar se os

esforços aplicados sobre a estrutura metálica do sistema, durante sua desmontagem, elevação pela ponte rolante, deslocamento e reinstalação poderiam afetar as medidas subsequentes.

As medidas obtidas são apresentadas nas TAB. 7 e 8. A primeira leitura do *display* foi feita sem miniplaca, através do contato ponta-a-ponta entre os sensores e, logo em seguida, a miniplaca foi posicionada e os nove pontos foram medidos. Os resultados foram obtidos através da diferença entre a primeira e a segunda leitura de cada ponto. As variações das espessuras medidas nos vários pontos das miniplacas *dummy* são atribuídas a não-uniformidades das espessuras obtidas na fabricação das mesmas.

TABELA 7 - Medidas de espessura da miniplaca *dummy* obtidas no primeiro, segundo e terceiro conjuntos de medições, dentro da piscina, para o comissionamento do SMEMC.

	Pontos	Coordenadas (mm)		Modo	1ª. leitura	2ª. leitura	Diferença -A+B	Resultado (μ m)
		x	y					
Primeiro conjunto de medidas	X1	10	145	-A+B	-266	1144	-(-266)+1144	1410
	X2	26	145	-A+B	-266	1144	-(-266)+1144	1410
	X3	42	145	-A+B	-266	1141	-(-266)+1141	1407
	Y1	10	85	-A+B	-266	1145	-(-266)+1145	1411
	Y2	26	85	-A+B	-266	1147	-(-266)+1147	1413
	Y3	42	85	-A+B	-266	1146	-(-266)+1146	1412
	Z1	10	25	-A+B	-266	1150	-(-266)+1150	1416
	Z2	26	25	-A+B	-266	1149	-(-266)+1149	1415
	Z3	42	25	-A+B	-266	1147	-(-266)+1147	1413
Segundo conjunto de medidas	X1	10	145	-A+B	-266	1145	-266+1145	1411
	X2	26	145	-A+B	-266	1145	-266+1145	1411
	X3	42	145	-A+B	-266	1141	-266+1141	1407
	Y1	10	85	-A+B	-266	1147	-266+1147	1413
	Y2	26	85	-A+B	-266	1148	-266+1148	1414
	Y3	42	85	-A+B	-266	1148	-266+1148	1414
	Z1	10	25	-A+B	-266	1148	-266+1148	1414
	Z2	26	25	-A+B	-266	1147	-266+1147	1413
	Z3	42	25	-A+B	-266	1149	-266+1149	1415
Terceiro conjunto de medidas	X1	10	145	-A+B	-266	1146	-266+1146	1412
	X2	26	145	-A+B	-266	1144	-266+1144	1410
	X3	42	145	-A+B	-266	1144	-266+1144	1410
	Y1	10	85	-A+B	-266	1147	-266+1147	1413
	Y2	26	85	-A+B	-266	1148	-266+1148	1414
	Y3	42	85	-A+B	-266	1149	-266+1149	1415
	Z1	10	25	-A+B	-266	1150	-266+1150	1416
	Z2	26	25	-A+B	-266	1148	-266+1148	1414
	Z3	42	25	-A+B	-266	1150	-266+1150	1416

Fonte: Silva e Domingos (2009).

TABELA 8 - Medidas de espessura da miniplaca *dummy* obtidas no quarto e quinto conjuntos de medições, dentro da piscina, para o comissionamento do SMEMC.

	Pontos	Coordenadas (mm)		Modo	1ª. leitura	2ª. leitura	Diferença -A+B	Resultado (μm)
		x	y					
Quarto conjunto de medidas	X1	10	145	-A+B	-266	1145	-266+1145	1411
	X2	26	145	-A+B	-266	1146	-266+1146	1412
	X3	42	145	-A+B	-266	1145	-266+1145	1411
	Y1	10	85	-A+B	-266	1148	-266+1148	1414
	Y2	26	85	-A+B	-266	1148	-266+1148	1414
	Y3	42	85	-A+B	-266	1148	-266+1148	1414
	Z1	10	25	-A+B	-266	1151	-266+1151	1417
	Z2	26	25	-A+B	-266	1151	-266+1151	1417
	Z3	42	25	-A+B	-266	1152	-266+1152	1418
Quinto conjunto de medidas	X1	10	145	-A+B	-266	1148	-(-266+1148)	1414
	X2	26	145	-A+B	-266	1145	-(-266+1145)	1411
	X3	42	145	-A+B	-266	1144	-(-266+1144)	1410
	Y1	10	85	-A+B	-266	1149	-(-266+1149)	1415
	Y2	26	85	-A+B	-266	1146	-(-266+1146)	1412
	Y3	42	85	-A+B	-266	1150	-(-266+1150)	1416
	Z1	10	25	-A+B	-266	1149	-(-266+1149)	1415
	Z2	26	25	-A+B	-266	1149	-(-266+1149)	1415
	Z3	42	25	-A+B	-266	1146	-(-266+1146)	1412

Fonte: Silva e Domingos (2009).

Os resultados das medições após reinstalação da estrutura metálica da bancada na borda da piscina estiveram dentro da faixa de variação obtidos nas medidas anteriores, não indicando evidências de influências advindas de deformações ou esforços na estrutura durante a desmontagem e nova montagem na piscina.

A FIG. 28 apresenta a média das cinco medidas obtidas dentro da piscina para cada ponto determinado e o desvio padrão em torno da média de cada ponto. O desvio padrão em cada ponto não ultrapassa 4 μm , indicando boa precisão das medições, estando o sistema capacitado para medir as variações de espessura para avaliação do inchamento das miniplacas combustíveis ao longo da irradiação.

4.3.2.4. Procedimento para medição de espessura

A montagem dos sensores LVDT na estrutura metálica é feita quando a estrutura encontra-se fora da piscina, conforme mostrado na FIG. 29. A pressão de ar no módulo pneumático é regulada em 1 bar (14,7 psi). Após montagem da bancada na sua posição de trabalho, dentro da piscina, são feitas as ligações dos equipamentos eletrônicos do sistema de medição, conforme esquema da FIG. 30.

FIGURA 28 - Média das medidas na piscina do reator e os desvios padrão. (Silva e Domingos, 2009).

FIGURA 29 - Estrutura metálica do SMEMC apoiada no piso do saguão do IEA-R1 para a instalação dos sensores LVDT.

FIGURA 30 - Esquema de montagem dos equipamentos do SMEMC.

A medição de espessura da miniplaca é obtida a partir da leitura dos deslocamentos efetuados pelos sensores, primeiramente sem a miniplaca, até que as pontas dos sensores (A e B) se encostem, sendo obtida a primeira leitura. Em seguida, é colocada a miniplaca e os sensores são acionados, sendo obtida a segunda leitura. A diferença entre os valores é a espessura da miniplaca no ponto medido. Nas FIG. 31 e 32 são mostradas fotos da montagem do SMEMC na piscina do reator IEA-R1.

FIGURA 31 - Estrutura metálica instalada dentro da piscina.

FIGURA 32 - Equipamentos eletrônicos instalados na borda da piscina.

Para realizar o ensaio de medição de espessura de miniplaca irradiada, o DIM será retirado da placa matriz, com o reator desligado e levado até o alojamento "A" do *rack* suporte (FIG. 33 e 37) que deverá estar instalado ao lado da bancada do SMEMC. O manuseio é feito pelo operador do reator com acompanhamento da equipe de proteção radiológica. O *rack* suporte mantém o DIM e o estojo das miniplacas a uma profundidade de 2 m, para blindagem da radiação. A retirada do estojo que contém as miniplacas irradiadas do interior da caixa do DIM é feita com o auxílio de uma ferramenta existente no reator IEA-R1, mostrada na FIG. 34.

A retirada de cada miniplaca combustível do interior do estojo é feita com o auxílio de uma ferramenta especial para manuseio, mostrada na FIG. 35. A miniplaca irradiada, uma vez retirada do estojo do DIM, é levada até uma morsa de fixação da bancada de medição. A abertura/fechamento da morsa da bancada é comandada por meio de um sistema de alavanca e cabo de aço existente ao lado da mesa X-Y-Z. O procedimento detalhado para o ensaio de medidas de espessuras das miniplacas é apresentado em documento interno do IPEN/CNEN-SP³⁷.

Os pontos adotados para as medições de espessuras nas miniplacas irradiadas são mostrados na FIG. 36. Outros pontos adicionais poderão ser adotados posteriormente.

FIGURA 33 - Vistas do rack suporte para o DIM e estojo das miniplacas.

³⁷ “Procedimento Operacional para Utilização do Dispositivo Medidor de Espessuras de Miniplacas Combustíveis Irradiadas no Reator IEA-R1” (Silva, 2010).

FIGURA 34 - Ferramenta para retirada do estojo do interior da caixa do DIM.

FIGURA 35 - Ferramenta de manuseio de miniplaca.

FIGURA 36 – Posições para medição de espessuras na miniplaca.

FIGURA 37 - Montagem do *rack* suporte para o DIM na plataforma submersa.

4.4. Metodologia para cálculo do inchamento do cerne

O cálculo do inchamento é feito a partir da relação entre os valores de espessuras medidos na miniplaca irradiada e a correspondente medida tomada na condição pré-irradiação. Os valores máximo local e médio da miniplaca combustível podem ser calculados usando a seguinte relação (Böning e Petry, 2009):

$$I_c [\%] = I_p [\%] \times f_v - P_c [\%], \quad (4.1)$$

onde:

- I_c = inchamento do cerne, o qual, em uma fina placa combustível com revestimento (que não incha) sobre ambos os lados, é idêntico ao aumento da espessura da placa combustível:

$$I_c [\%] = 100 \times (e_p - e_{p,0}) / e_{p,0} \quad (4.2)$$

Sendo que:

- e_p = espessura da placa combustível;
 - $e_{p,0}$ = espessura da placa combustível antes da irradiação;
 - I_p é o inchamento das partículas combustíveis, [%];
 - f_v é a fração em volume das partículas do U_3Si_2 no cerne de U_3Si_2 -Al antes da irradiação.
 - P_c é a porosidade “como-fabricada” do cerne combustível, expressa em % do volume. A porosidade é estabelecida durante o processo de fabricação e pode ser estimada usando uma relação empírica apresentada no Anexo B.
- ❖ O inchamento de uma miniplaca combustível hipotética de U_3Si_2 -Al, com 4,8 gU/cm³ (com $f_v = 0,425$ e porosidade $P_c = 0,12$), com as espessuras inicial $e_{p,0} = 1,520$ mm e final $e_p = 1,550$ mm, após alcançar determinada queima, pode ser calculado pela expressão (4.2) fornecendo:

$$I_c [\%] = 100 \times (e_p - e_{p,0}) / e_{p,0} \rightarrow I_c = 100 \times (1,550 - 1,520) / 1,520 = 1,97 \%$$

Substituindo da expressão (4.1), temos: $I_p [\%] = (I_c [\%] + P_c [\%]) / f_v \quad (4.3)$

e o inchamento das partículas de combustível resulta: $I_p = (1,97 + 0,12) / 0,425 = 4,917 \%$

Após serem alcançadas queimas médias de aproximadamente 5% da quantidade inicial de ^{235}U , serão feitas medidas das espessuras das miniplacas nos pontos

indicados na FIG. 36. As medidas deverão ser registradas e os resultados de inchamento poderão ser calculados, para cada ponto medido.

A cada montagem do SMEMC na piscina, além do uso dos blocos padrões para a verificação da calibração, é recomendado o uso de uma miniplaca *dummy* de referência, em todas as campanhas de medidas, para que seja verificada a reprodutibilidade das medidas para essa miniplaca. Havendo qualquer diferença nas medidas dessa miniplaca de referência, esta deverá ser descontada ou aumentada nos resultados obtidos das medidas das miniplacas irradiadas (Suripto et al., 1994).

4.5. Considerações adicionais sobre os ensaios de inspeção visual de miniplacas irradiadas

As miniplacas de testes devem reter os produtos de fissão do cerne ao longo do período de irradiação e também por todo o período de estocagem na piscina, que poderá se estender por muitos anos. As inspeções visuais das miniplacas irradiadas poderão indicar o comportamento das mesmas frente às condições operacionais a que estarão submetidas durante a irradiação no reator IEA-R1. A região do revestimento sobre a parte ativa da miniplaca irradiada fica normalmente delineada pela oxidação diferenciada sobre a mesma. A presença de manchas de oxidação, de menor ou maior intensidade, nas miniplacas contendo os diferentes tipos de combustíveis e densidades de urânio, podem indicar a existência de temperaturas diferenciadas nos revestimentos destas. A ocorrência de oxidação superficial acentuada sobre as miniplacas combustíveis constitui-se num fator altamente indesejável, uma vez que leva à diminuição da espessura do seu revestimento ao longo do período de irradiação ou armazenamento.

4.6. Avaliação da espessura da camada de óxido durante inspeção visual

Não se dispõe no IPEN/CNEN-SP de infraestrutura para medida de espessura de camada superficial de óxido de placas combustíveis irradiadas. Uma vez que os fluxos de nêutrons no IEA-R1 são baixos, isto acarreta que os tempos de irradiação das miniplacas serão mais longos que aqueles normalmente dispendidos nos testes de irradiação conduzidos em reatores estrangeiros com alto fluxo de nêutrons. Modelos empíricos disponíveis na literatura para predição de espessura da camada de óxido sobre ligas de alumínio em combustíveis possuem faixas de aplicação limitadas e não englobam situações operacionais de vários reatores tais como pH diferentes de 5 ou mesmo tempos de irradiação superiores a 500 dias (Kim et al., 2008). Os tempos previstos para os testes de irradiação no IEA-R1 (vide Capítulo 5) são maiores, podendo durar vários anos.

Este fato confere grande importância ao acompanhamento periódico da evolução da oxidação presente sobre as miniplacas combustíveis. Medidas de camada de óxido sobre placas combustíveis irradiadas são realizadas normalmente no interior de células quentes empregando a técnica de correntes parasitas (Leenaers et al., 2008; Robinson et al., 2007). Esta técnica também foi estudada e proposta para a medida de camada de óxidos sobre placas combustíveis irradiadas de MTR na piscina do reator por Alencar (2004).

A partir do trabalho de Leenaers et al. (2007) considerou-se a possibilidade de se fazer avaliações “qualitativas” das espessuras das camadas de óxido presentes sobre as miniplacas combustíveis de testes, a partir das tonalidades de cores dos óxidos. Aqueles pesquisadores realizaram medições em célula quente da espessura dos óxidos presentes sobre uma placa combustível *full size* irradiada, contendo $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) e revestimento de alumínio³⁸, tendo sido mapeadas as regiões em função das espessuras dos óxidos. A partir da fotografia da placa combustível irradiada e do mapeamento das espessuras dos óxidos medidos por aqueles pesquisadores, foram selecionadas 10 regiões com espessuras de camadas de óxido bem definidas, conforme indicado na FIG. 38. Uma vez definidas estas regiões no gráfico das espessuras das camadas de óxido medidas, foram selecionadas as regiões correspondentes na imagem da placa combustível obtida na inspeção visual, cujos padrões de cores e tonalidades são representados na FIG. 39. Uma estimativa da espessura local da camada de óxido presente nas miniplacas pode ser obtida, em princípio, a partir da comparação das cores e tonalidades características do óxido presente com os padrões obtidos.

O desenvolvimento de uma metodologia mais apurada no futuro, para a avaliação qualitativa da espessura dos óxidos durante as inspeções visuais, poderá ser obtido por meio de: (i) realização de testes de oxidação com o material Al 6061 empregado no revestimento das miniplacas, em circuito térmico experimental, fora do reator, para desenvolvimento de camada de oxidação (corrosão) superficial nas amostras; (ii) posterior medida das camadas de óxido por meio de técnicas de correntes parasitas ou metalografia; (iii) estabelecimento de correlação entre as cores e tonalidades do óxido com as espessuras medidas.

³⁸ Combustível $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) e revestimento AlFeNi, uma liga de Al com 1% Fe, 1% Ni e 1% Mg (Böning e Petry, 2009).

FIGURA 38 - Correlação da coloração do óxido sobre placa combustível com a espessura do óxido obtida em medida experimental durante PIE, ($\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, $4,8 \text{ gU/cm}^3$).
(Adaptado do trabalho de Leenaers et al., 2007).

FIGURA 39 - Padrões de tonalidades de cor correlacionadas com as espessuras das camadas obtidas em medida experimental durante PIE em célula quente (placa combustível de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, $4,8 \text{ gU/cm}^3$, com revestimento AlFeNi - liga de Al com 1% Fe, 1% Ni e 1% Mg).

Adaptado do trabalho de Leenaers et al., (2007).

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização pré-irradiação das miniplacas combustíveis

Dentre as miniplacas fabricadas pelo Centro do Combustível Nuclear (CCN) do IPEN-CNEN/SP, dez foram selecionadas para os testes de irradiação no IEA-R1, cinco com $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ e cinco com $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$. Das miniplacas com $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, três possuem concentrações de urânio de $4,8 \text{ g/cm}^3$ e duas de $3,1 \text{ g/cm}^3$. Da mesma forma, das miniplacas com $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$, três possuem concentrações de urânio de $3,2 \text{ g/cm}^3$ e duas de $2,3 \text{ g/cm}^3$.

A seleção para irradiação de algumas miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ e $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ com concentrações de $3,1$ e $2,3 \text{ gU/cm}^3$, respectivamente (representativas dos combustíveis empregados na fabricação dos atuais EC para o reator IEA-R1), foi adotada para possibilitar a comparação dos comportamentos sob irradiação com as miniplacas contendo maior densidade de urânio. A identificação e características das miniplacas combustíveis empregadas nos testes de irradiação no reator IEA-R1 estão discriminadas na TAB. 9.

Relatórios de análises químicas, caracterização material e dimensional das miniplacas, análise dimensional da fabricação, análise radiográfica dos núcleos (cernes), controle de contaminação superficial, assim como registros fotográficos de todas as miniplacas combustíveis produzidas no CCN para os testes de irradiação no IEA-R1, encontram-se reunidos em um documento interno³⁹ emitido pelo IPEN/CNEN-SP (IPEN, 2011).

5.1.1. Registro dimensional

Foram realizadas as medições de espessuras das miniplacas antes do carregamento das mesmas no DIM. Foram obtidas quatro medidas em cada ponto indicado na FIG. 36. As médias das medidas obtidas para cada ponto são apresentadas nas TAB. 10 e 11. Os máximos desvios em relação às médias foram $2 \mu\text{m}$, sendo que as medidas de cada ponto apresentaram boa repetibilidade.

Foi adotada uma miniplaca *dummy* de alumínio para servir como "referência" para as posteriores medidas de espessura, após cada ciclo sucessivo de irradiação, a fim de avaliar a reprodutibilidade dos resultados e a eventual necessidade de correções nas medidas. As dimensões da miniplaca de referência estão apresentadas na TAB. 6.

³⁹ Documento de Qualificação DQMP-CCN-001-00 Miniplaca Combustível de U_3Si_2 ($3,1$ e $4,8 \text{ gU/cm}^3$) e Miniplaca Combustível de U_3O_8 ($2,3$ e $3,2 \text{ gU/cm}^3$), (IPEN, 2011)

TABELA 9 - Características pré-irradiação das miniplacas combustíveis fabricadas pelo IPEN/CNEN-SP (Si = U_3Si_2 ; Ox = U_3O_8).

Identificação da Miniplaca	Dimensões da miniplaca			Massa de Urânio		Massa de ^{235}U (g)	Porosidade no cerne (vol %)	Dimensões do Cerne (análise radiográfica)		Concentração (gU/cm ³)	Razão Isotópica (% de ^{235}U)
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	U_3O_8 (g)	U_3Si_2 (g)			Comprimento (mm)	Largura (mm)		
SIE 01 - 3,1	170,02	52,13	Vide TAB. 10	-	10,42	2,08	7,65	121,40	41,24	3,1	19,92
SIE 05 - 3,1	170,18	52,01		-	10,41	2,07	7,40	114,70	41,20	3,1	19,92
SIE 02 - 4,8	170,00	52,03		-	16,13	3,21	10,44	126,52	41,64	4,8	19,92
SIE 03 - 4,8	170,11	52,03		-	16,14	3,22	12,03	117,86	42,32	4,8	19,92
SIE 04 - 4,8	170,12	52,15		-	16,14	3,22	12,36	117,86	42,18	4,8	19,92
OXE 01 - 2,3	170,02	52,00	Vide TAB. 11	7,72	-	1,54	10,85	119,32	41,66	2,3	19,94
OXE 03 - 2,3	169,98	52,00		7,73	-	1,54	10,81	114,95	41,52	2,3	19,94
OXE 03 - 3,2	170,02	52,14		10,74	-	2,14	14,18	120,48	41,70	3,2	19,94
OXE 10 - 3,2	170,02	52,03		10,75	-	2,14	15,05	116,90	41,56	3,2	19,94
OXE 04 - 3,2	169,96	51,92		10,72	-	2,14	14,73	116,46	41,86	3,2	19,94

Legenda: SI = U_3Si_2 ; OX = U_3O_8

E = Enriquecido

Fonte - IPEN (2011)

TABELA 10 - Médias das medidas de espessura obtidas nas miniplacas de U_3Si_2-Al , antes da irradiação.

Eixo X (mm)	Eixo Y (mm)	Identificação da miniplaca				
		SIE02-4,8	SIE03-4,8	SIE04-4,8	SIE01-3,1	SIE05-3,1
35,00	6,00	1,553	1,564	1,564	1,555	1,568
35,00	16,00	1,553	1,564	1,564	1,555	1,568
35,00	26,00	1,553	1,564	1,564	1,555	1,568
35,00	36,00	1,553	1,564	1,564	1,555	1,568
35,00	46,00	1,553	1,568	1,564	1,555	1,568
55,00	6,00	1,558	1,568	1,567	1,562	1,568
55,00	16,00	1,558	1,568	1,567	1,562	1,568
55,00	26,00	1,558	1,568	1,567	1,562	1,568
55,00	36,00	1,558	1,568	1,567	1,562	1,568
55,00	46,00	1,558	1,568	1,567	1,562	1,568
85,00	6,00	1,559	1,570	1,568	1,563	1,571
85,00	16,00	1,559	1,570	1,568	1,563	1,571
85,00	26,00	1,559	1,570	1,568	1,563	1,571
85,00	36,00	1,559	1,571	1,568	1,564	1,571
85,00	46,00	1,559	1,570	1,568	1,564	1,571
115,00	6,00	1,561	1,570	1,568	1,563	1,571
115,00	16,00	1,561	1,572	1,568	1,564	1,572
115,00	26,00	1,561	1,572	1,568	1,564	1,572
115,00	36,00	1,561	1,572	1,568	1,564	1,572
115,00	46,00	1,561	1,572	1,568	1,564	1,572
135,00	6,00	1,560	1,568	1,566	1,562	1,572
135,00	16,00	1,560	1,568	1,566	1,562	1,572
135,00	26,00	1,560	1,568	1,566	1,562	1,571
135,00	36,00	1,560	1,568	1,566	1,562	1,571
135,00	46,00	1,560	1,568	1,566	1,562	1,571

TABELA 11 - Médias das medidas de espessura obtidas nas miniplacas de U_3O_8-Al , antes da irradiação.

Eixo X (mm)	Eixo Y (mm)	Identificação da miniplaca				
		OXE01-3,2	OXE03-3,2	OXE04-3,2	OXE01-2,3	OXE03-2,3
35,00	6,00	1,565	1,548	1,549	1,558	1,562
35,00	16,00	1,565	1,548	1,549	1,558	1,562
35,00	26,00	1,565	1,548	1,549	1,558	1,562
35,00	36,00	1,565	1,548	1,549	1,558	1,562
35,00	46,00	1,565	1,566	1,549	1,558	1,562
55,00	6,00	1,568	1,566	1,554	1,564	1,568
55,00	16,00	1,568	1,566	1,554	1,564	1,568
55,00	26,00	1,568	1,566	1,554	1,564	1,568
55,00	36,00	1,568	1,566	1,554	1,564	1,568
55,00	46,00	1,568	1,566	1,554	1,564	1,568
85,00	6,00	1,568	1,566	1,556	1,564	1,568
85,00	16,00	1,568	1,566	1,556	1,564	1,568
85,00	26,00	1,568	1,566	1,556	1,564	1,568

(Continua na próxima página . . .)

85,00	36,00	1,568	1,566	1,556	1,564	1,568
85,00	46,00	1,568	1,566	1,556	1,564	1,568
115,00	6,00	1,567	1,568	1,556	1,565	1,568
115,00	16,00	1,567	1,568	1,556	1,565	1,568
115,00	26,00	1,567	1,568	1,556	1,565	1,568
115,00	36,00	1,567	1,568	1,556	1,565	1,568
115,00	46,00	1,567	1,568	1,556	1,565	1,568
135,00	6,00	1,562	1,562	1,558	1,564	1,568
135,00	16,00	1,562	1,562	1,558	1,564	1,568
135,00	26,00	1,562	1,562	1,558	1,564	1,568
135,00	36,00	1,562	1,562	1,558	1,564	1,568
135,00	46,00	1,562	1,562	1,558	1,564	1,568

5.1.2. Registro fotográfico

Após a fabricação e controle de qualidade final, as miniplacas combustíveis foram fotografadas para registro das condições gerais pré-irradiação das mesmas. Os registros fotográficos pré-irradiação das dez miniplacas selecionadas para irradiação fazem parte do documento DQMP-CCN-001-00 (IPEN, 2011). Na FIG. 40 são mostradas fotografias da miniplaca SIE02, com U_3Si_2-Al , concentração de $4,8 \text{ gU/cm}^3$.

FIGURA 40 - Fotografias da Miniplaca SIE02-4,8.

Fonte: (IPEN, 2011)

5.2. Condições da irradiação

5.2.1. Carregamento das miniplacas no DIM

Dez miniplacas combustíveis (relacionadas na TAB. 9) foram carregadas no DIM, segundo o diagrama de montagem indicado na FIG. 41. As FIG. 42(a) e 42(b) mostram, respectivamente, as miniplacas combustíveis no estojo e o próprio estojo montado no interior da caixa do DIM. O projeto do DIM mantém as miniplacas paralelas com as placas combustíveis dos EC do núcleo. O DIM foi carregado na posição 36 da placa matriz do reator IEA-R1 (posição periférica do núcleo).

FIGURA 41 – Croqui ilustrativo da montagem das miniplacas no DIM - Configuração 1.

FIGURA 42 - (a) Carregamento das miniplacas no DIM para início da irradiação; (b) Vista do estojo montado no interior da caixa do DIM.

Fonte: (IPEN, 2011)

5.2.2. Início da irradiação

A irradiação teve início em 06/06/2011, com operação do reator IEA-R1 a 4,0 MW, na configuração 246 do núcleo, indicada na FIG. 43 e em regime de irradiação de 62 horas semanais. A partir de 01/08/2011, a potência de operação do reator foi aumentada para 4,5 MW, devendo permanecer neste nível até o início do ano de 2012, ocasião em que deverá passar a 5,0 MW⁴⁰.

FIGURA 43 - Configuração 246 do núcleo do IEA-R1.

Fonte: CRPq, IPEN/CNEN-SP, Julho/2011.

5.3. Parâmetros neutrônicos calculados para as miniplacas

5.3.1. Fluxo de nêutrons

Por meio de modelagem tridimensional do núcleo (configuração 246) do reator IEA-R1 utilizando o programa CITATION, foram obtidos os fluxos de nêutrons rápidos e

⁴⁰ Cronograma do CRPq, IPEN/CNEN-SP, em 27/05/2011.

térmicos ao longo do comprimento ativo das miniplacas no DIM, para as condições de potência e regime de operação do reator existentes por ocasião do início da irradiação, respectivamente de 4,0 MW e 62 horas semanais. As seções de choque dos materiais do DIM foram geradas pelo programa HAMMER-TEC e utilizadas como dados de entrada para o programa CITATION. As TAB. 12 e 13 apresentam os fluxos de nêutrons do grupo 1 (rápidos, $E > 1,0$ MeV) e do grupo 2 (térmicos, $E < 0,625$ eV) para as miniplacas com U_3O_8-Al , com 2,3 e 3,2 gU/cm³. As TAB. 14 e 15 apresentam esses parâmetros para as miniplacas com U_3Si_2-Al , com 3,1 e 4,8 gU/cm³, respectivamente. Na modelagem da altura Z do núcleo foram consideradas 65 malhas, sendo que as malhas numeradas de 30 a 39 correspondem às cotas das malhas 38 a 47 da modelagem anteriormente realizada (indicadas na FIG. 20).

TABELA 12 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3O_8-Al , com 2,3 gU/cm³ (posições 10ª e 9ª do estojo). DIM na posição 36. Reator a 4,0 MW.

Malhas	Z (CM)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 (n/cm ² .s)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 (n/cm ² .s)
1	1.5000	2.8584E+10	7.5636E+10
2	4.5000	6.0625E+10	2.0687E+11
3	7.5000	1.1575E+11	4.0568E+11
4	10.5000	2.1496E+11	7.4573E+11
5	13.5000	3.9594E+11	1.3383E+12
6	16.5000	7.2700E+11	2.3515E+12
7	19.5000	1.3313E+12	4.0031E+12
8	22.5000	2.4263E+12	6.4433E+12
9	24.8500	3.9126E+12	8.4999E+12
10	26.5500	5.2011E+12	9.8119E+12
11	28.2500	6.7598E+12	1.1092E+13
12	29.9719	8.5734E+12	1.2347E+13
13	31.7156	1.0459E+13	1.3921E+13
14	33.4594	1.2369E+13	1.5782E+13
15	35.2031	1.4319E+13	1.7856E+13
16	36.9469	1.6330E+13	2.0091E+13
17	38.6906	1.8413E+13	2.2455E+13
18	40.4344	2.0578E+13	2.4929E+13
19	42.1781	2.2824E+13	2.7500E+13
20	43.9219	2.5147E+13	3.0150E+13
21	45.6656	2.7536E+13	3.2858E+13
22	47.4094	2.9973E+13	3.5597E+13
23	49.1531	3.2438E+13	3.8325E+13
24	50.8969	3.4911E+13	4.0984E+13
25	52.6406	3.7382E+13	4.3462E+13
26	54.3844	3.9873E+13	4.5519E+13
27	56.1281	4.2485E+13	4.6484E+13
28	57.6500	4.5082E+13	4.4755E+13
29	58.9500	4.7437E+13	4.2768E+13
30	60.1900	5.0172E+13	3.8767E+13

(Continua na próxima página . . .)

31	61.3700	5.1838E+13	3.7359E+13
32	62.5500	5.2993E+13	3.6784E+13
33	63.7300	5.3766E+13	3.6600E+13
34	64.9100	5.4211E+13	3.6594E+13
35	66.0900	5.4349E+13	3.6678E+13
36	67.2700	5.4178E+13	3.6851E+13
37	68.4500	5.3668E+13	3.7203E+13
38	69.6300	5.2754E+13	3.7949E+13
39	70.8100	5.1298E+13	3.9540E+13
40	72.0500	4.8741E+13	4.3814E+13
41	73.3500	4.6541E+13	4.6053E+13
42	74.6864	4.4369E+13	4.7855E+13
43	76.0591	4.2322E+13	4.7547E+13
44	77.4318	4.0309E+13	4.6188E+13
45	78.8045	3.8233E+13	4.4310E+13
46	80.1773	3.6045E+13	4.2133E+13
47	81.5500	3.3718E+13	3.9763E+13
48	82.9227	3.1234E+13	3.7272E+13
49	84.2955	2.8579E+13	3.4729E+13
50	85.6682	2.5744E+13	3.2222E+13
51	87.0409	2.2724E+13	2.9863E+13
52	88.4136	1.9543E+13	2.7756E+13
53	89.7250	1.6461E+13	2.5942E+13
54	91.2500	1.3119E+13	2.3452E+13
55	93.0500	1.0036E+13	1.9314E+13
56	94.8500	7.8178E+12	1.4292E+13
57	97.0000	6.3047E+12	9.7377E+12
58	99.5000	4.9829E+12	7.5163E+12
59	102.0000	3.8778E+12	5.8995E+12
60	104.5000	2.9550E+12	4.7662E+12
61	107.0000	2.1773E+12	4.0508E+12
62	109.5000	1.3852E+12	3.3763E+12
63	112.0000	8.2422E+11	2.2763E+12
64	114.5000	4.7498E+11	1.3466E+12
65	117.0000	2.4799E+11	5.4261E+11

TABELA 13 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3O_8-Al , com 3,2 gU/cm^3 (posições 8^a, 7^a e 6^a do estojo). DIM na posição 36. Reator a 4,0 MW.

Malhas	Z (CM)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 (n/cm ² .s)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 (n/cm ² .s)
1	1.5000	2.6515E+10	7.0579E+10
2	4.5000	5.6106E+10	1.9285E+11
3	7.5000	1.0674E+11	3.7742E+11
4	10.5000	1.9730E+11	6.9205E+11
5	13.5000	3.6121E+11	1.2390E+12
6	16.5000	6.5792E+11	2.1736E+12
7	19.5000	1.1919E+12	3.7023E+12
8	22.5000	2.1412E+12	5.9899E+12
9	24.8500	3.3994E+12	8.0123E+12
10	26.5500	4.4691E+12	9.3435E+12
11	28.2500	5.7261E+12	1.0729E+13
12	29.9719	7.1524E+12	1.2206E+13
13	31.7156	8.6694E+12	1.3891E+13

(Continua na próxima página . . .)

14	33.4594	1.0229E+13	1.5775E+13
15	35.2031	1.1829E+13	1.7826E+13
16	36.9469	1.3480E+13	2.0016E+13
17	38.6906	1.5188E+13	2.2323E+13
18	40.4344	1.6958E+13	2.4732E+13
19	42.1781	1.8790E+13	2.7227E+13
20	43.9219	2.0680E+13	2.9792E+13
21	45.6656	2.2620E+13	3.2407E+13
22	47.4094	2.4598E+13	3.5044E+13
23	49.1531	2.6603E+13	3.7665E+13
24	50.8969	2.8628E+13	4.0213E+13
25	52.6406	3.0682E+13	4.2574E+13
26	54.3844	3.2819E+13	4.4482E+13
27	56.1281	3.5198E+13	4.5192E+13
28	57.6500	3.7816E+13	4.3129E+13
29	58.9500	4.0301E+13	4.0668E+13
30	60.1900	4.3403E+13	3.6118E+13
31	61.3700	4.5179E+13	3.4445E+13
32	62.5500	4.6347E+13	3.3718E+13
33	63.7300	4.7096E+13	3.3448E+13
34	64.9100	4.7510E+13	3.3397E+13
35	66.0900	4.7620E+13	3.3466E+13
36	67.2700	4.7422E+13	3.3656E+13
37	68.4500	4.6878E+13	3.4066E+13
38	69.6300	4.5894E+13	3.4936E+13
39	70.8100	4.4270E+13	3.6765E+13
40	72.0500	4.1280E+13	4.1559E+13
41	73.3500	3.8888E+13	4.4245E+13
42	74.6864	3.6638E+13	4.6290E+13
43	76.0591	3.4699E+13	4.6191E+13
44	77.4318	3.2906E+13	4.4951E+13
45	78.8045	3.1124E+13	4.3160E+13
46	80.1773	2.9283E+13	4.1062E+13
47	81.5500	2.7349E+13	3.8773E+13
48	82.9227	2.5302E+13	3.6360E+13
49	84.2955	2.3130E+13	3.3877E+13
50	85.6682	2.0830E+13	3.1383E+13
51	87.0409	1.8415E+13	2.8936E+13
52	88.4136	1.5925E+13	2.6574E+13
53	89.7250	1.3572E+13	2.4357E+13
54	91.2500	1.1009E+13	2.1533E+13
55	93.0500	8.5841E+12	1.7508E+13
56	94.8500	6.8038E+12	1.2925E+13
57	97.0000	5.5804E+12	8.8710E+12
58	99.5000	4.4643E+12	6.8783E+12
59	102.0000	3.5049E+12	5.4195E+12
60	104.5000	2.6880E+12	4.3917E+12
61	107.0000	1.9894E+12	3.7389E+12
62	109.5000	1.2696E+12	3.1139E+12
63	112.0000	7.5758E+11	2.1005E+12
64	114.5000	4.3759E+11	1.2437E+12
65	117.0000	2.2883E+11	5.0144E+11

TABELA 14 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3Si_2-Al , com 3,1 gU/cm³ (posições 5^a e 4^a do estojo). DIM na posição 36. Reator a 4,0 MW.

Malhas	Z (CM)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 (n/cm ² .s)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 (n/cm ² .s)
1	1.5000	2.4453E+10	6.5394E+10
2	4.5000	5.1613E+10	1.7848E+11
3	7.5000	9.7824E+10	3.4854E+11
4	10.5000	1.7992E+11	6.3757E+11
5	13.5000	3.2736E+11	1.1392E+12
6	16.5000	5.9165E+11	1.9975E+12
7	19.5000	1.0614E+12	3.4098E+12
8	22.5000	1.8835E+12	5.5532E+12
9	24.8500	2.9515E+12	7.5001E+12
10	26.5500	3.8419E+12	8.7640E+12
11	28.2500	4.8663E+12	1.0099E+13
12	29.9719	6.0127E+12	1.1549E+13
13	31.7156	7.2433E+12	1.3160E+13
14	33.4594	8.5205E+12	1.4921E+13
15	35.2031	9.8384E+12	1.6816E+13
16	36.9469	1.1199E+13	1.8827E+13
17	38.6906	1.2606E+13	2.0939E+13
18	40.4344	1.4061E+13	2.3139E+13
19	42.1781	1.5563E+13	2.5411E+13
20	43.9219	1.7110E+13	2.7741E+13
21	45.6656	1.8696E+13	3.0111E+13
22	47.4094	2.0313E+13	3.2494E+13
23	49.1531	2.1956E+13	3.4858E+13
24	50.8969	2.3627E+13	3.7152E+13
25	52.6406	2.5345E+13	3.9279E+13
26	54.3844	2.7176E+13	4.1006E+13
27	56.1281	2.9294E+13	4.1697E+13
28	57.6500	3.1733E+13	4.0019E+13
29	58.9500	3.4132E+13	3.7681E+13
30	60.1900	3.7186E+13	3.3356E+13
31	61.3700	3.8916E+13	3.1752E+13
32	62.5500	4.0031E+13	3.1036E+13
33	63.7300	4.0730E+13	3.0757E+13
34	64.9100	4.1105E+13	3.0693E+13
35	66.0900	4.1190E+13	3.0749E+13
36	67.2700	4.0982E+13	3.0927E+13
37	68.4500	4.0439E+13	3.1318E+13
38	69.6300	3.9461E+13	3.2150E+13
39	70.8100	3.7840E+13	3.3879E+13
40	72.0500	3.4855E+13	3.8399E+13
41	73.3500	3.2506E+13	4.0915E+13
42	74.6864	3.0377E+13	4.2557E+13
43	76.0591	2.8607E+13	4.2382E+13
44	77.4318	2.7026E+13	4.1231E+13
45	78.8045	2.5495E+13	3.9600E+13
46	80.1773	2.3941E+13	3.7702E+13
47	81.5500	2.2327E+13	3.5635E+13
48	82.9227	2.0634E+13	3.3456E+13
49	84.2955	1.8852E+13	3.1208E+13

(Continua na próxima página . . .)

50	85.6682	1.6984E+13	2.8930E+13
51	87.0409	1.5044E+13	2.6657E+13
52	88.4136	1.3075E+13	2.4401E+13
53	89.7250	1.1236E+13	2.2231E+13
54	91.2500	9.2317E+12	1.9481E+13
55	93.0500	7.3132E+12	1.5740E+13
56	94.8500	5.8888E+12	1.1619E+13
57	97.0000	4.9088E+12	8.0405E+12
58	99.5000	3.9752E+12	6.2641E+12
59	102.0000	3.1493E+12	4.9552E+12
60	104.5000	2.4316E+12	4.0280E+12
61	107.0000	1.8080E+12	3.4354E+12
62	109.5000	1.1576E+12	2.8585E+12
63	112.0000	6.9289E+11	1.9292E+12
64	114.5000	4.0122E+11	1.1433E+12
65	117.0000	2.1016E+11	4.6128E+11

TABELA 15 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3Si_2 -Al, com 4,8 gU/cm³ (posições 3^a, 2^a e 1^a do estojo). DIM na posição 36. Reator a 4,0 MW.

Malhas	Z (CM)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 (n/cm ² .s)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 (n/cm ² .s)
1	1.5000	2.2425E+10	6.0196E+10
2	4.5000	4.7207E+10	1.6409E+11
3	7.5000	8.9121E+10	3.1976E+11
4	10.5000	1.6311E+11	5.8368E+11
5	13.5000	2.9503E+11	1.0417E+12
6	16.5000	5.2963E+11	1.8284E+12
7	19.5000	9.4294E+11	3.1373E+12
8	22.5000	1.6592E+12	5.1654E+12
9	24.8500	2.5768E+12	7.0326E+12
10	26.5500	3.3261E+12	8.1630E+12
11	28.2500	4.1735E+12	9.3488E+12
12	29.9719	5.1128E+12	1.0645E+13
13	31.7156	6.1243E+12	1.2075E+13
14	33.4594	7.1803E+12	1.3625E+13
15	35.2031	8.2744E+12	1.5283E+13
16	36.9469	9.4056E+12	1.7037E+13
17	38.6906	1.0575E+13	1.8874E+13
18	40.4344	1.1782E+13	2.0783E+13
19	42.1781	1.3026E+13	2.2749E+13
20	43.9219	1.4306E+13	2.4760E+13
21	45.6656	1.5615E+13	2.6797E+13
22	47.4094	1.6952E+13	2.8839E+13
23	49.1531	1.8313E+13	3.0860E+13
24	50.8969	1.9704E+13	3.2818E+13
25	52.6406	2.1146E+13	3.4641E+13
26	54.3844	2.2700E+13	3.6172E+13
27	56.1281	2.4520E+13	3.7004E+13
28	57.6500	2.6649E+13	3.6268E+13
29	58.9500	2.8775E+13	3.4515E+13
30	60.1900	3.1680E+13	3.0800E+13
31	61.3700	3.3238E+13	2.9506E+13

(Continua na próxima página . . .)

32	62.5500	3.4227E+13	2.8942E+13
33	63.7300	3.4844E+13	2.8728E+13
34	64.9100	3.5170E+13	2.8682E+13
35	66.0900	3.5234E+13	2.8727E+13
36	67.2700	3.5035E+13	2.8864E+13
37	68.4500	3.4536E+13	2.9168E+13
38	69.6300	3.3647E+13	2.9823E+13
39	70.8100	3.2165E+13	3.1212E+13
40	72.0500	2.9298E+13	3.5066E+13
41	73.3500	2.7194E+13	3.6938E+13
42	74.6864	2.5313E+13	3.7673E+13
43	76.0591	2.3770E+13	3.7235E+13
44	77.4318	2.2403E+13	3.6155E+13
45	78.8045	2.1092E+13	3.4735E+13
46	80.1773	1.9775E+13	3.3112E+13
47	81.5500	1.8420E+13	3.1358E+13
48	82.9227	1.7010E+13	2.9513E+13
49	84.2955	1.5539E+13	2.7612E+13
50	85.6682	1.4009E+13	2.5684E+13
51	87.0409	1.2435E+13	2.3751E+13
52	88.4136	1.0852E+13	2.1818E+13
53	89.7250	9.3808E+12	1.9933E+13
54	91.2500	7.7732E+12	1.7481E+13
55	93.0500	6.2300E+12	1.4087E+13
56	94.8500	5.0826E+12	1.0404E+13
57	97.0000	4.2980E+12	7.2573E+12
58	99.5000	3.5212E+12	5.6798E+12
59	102.0000	2.8149E+12	4.5106E+12
60	104.5000	2.1881E+12	3.6781E+12
61	107.0000	1.6349E+12	3.1425E+12
62	109.5000	1.0503E+12	2.6122E+12
63	112.0000	6.3068E+11	1.7639E+12
64	114.5000	3.6614E+11	1.0463E+12
65	117.0000	1.9213E+11	4.2244E+11

5.3.2. Taxas de fissões (densidades de potência geradas)

A taxa média de fissões (fissões/cm³.s) para cada tipo de miniplaca foi obtida multiplicando a seção de choque macroscópica média de fissão Σ_f pelo fluxo médio de nêutrons $\bar{\phi}$. Para a obtenção das seções de choque macroscópicas médias para cada tipo de miniplaca, foram divididos os valores do produto $(\nu \cdot \Sigma_f)$ fornecidos pelo CITATION (relacionados na TAB. 16) pelo número médio de nêutrons liberados por fissão do ²³⁵U ($\nu=2,44$) (Duderstadt, 1976; Terremoto, 2004).

TABELA 16 – Produto ($\nu \cdot \Sigma_f$) gerado pelo programa CITATION para as miniplacas combustíveis, para a configuração 246 do núcleo do reator IEA-R1.

Miniplaca	Grupo 1 (Nêutrons rápidos)	Grupo 2 (Nêutrons térmicos)
	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)
U ₃ O ₈ - 2,3 gU/cm ³	1.41640E-03	5.24342E-02
U ₃ O ₈ - 3,2 gU/cm ³	1.80113E-03	6.44217E-02
U ₃ Si ₂ - 3,1 gU/cm ³	1.83139E-03	6.54470E-02
U ₃ Si ₂ - 4,8 gU/cm ³	2.85598E-03	2.85598 E-03

As TAB. 17 a 28 apresentam, respectivamente, as taxas de fissões calculadas para cada tipo de miniplaca no estojo do DIM, para as potências de 4,0 MW, 4,5 MW e 5,0 MW. Nas tabelas, os resultados são indicados em negrito para as malhas numeradas de 30 a 39, posicionadas nas cotas 60,19 cm a 70,81 cm, respectivamente. São obtidos os valores médios dos parâmetros ao longo do comprimento ativo das miniplacas, que foram usados nos cálculos dos tempos totais previstos para a irradiação das miniplacas.

5.4. Tempos de irradiação e densidade de fissões nas miniplacas

Com base nos parâmetros neutrônicos obtidos através do programa computacional CITATION, foram avaliados os tempos de irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% de ²³⁵U e as correspondentes densidades de fissões no cerne e nas partículas combustíveis. Estimativas dos tempos de duração da irradiação foram feitas considerando os casos de operação do reator nas potências nominais de 4,0 MW, 4,5 MW e 5,0 MW com escala de 62 horas semanais e de 5,0 MW, com escala de 120 horas semanais de irradiação. Os fluxos de nêutrons dos grupos 1 (rápidos) e 2 (térmicos), para as potências de 4,5 e 5,0 MW, foram obtidos através da multiplicação dos fluxos calculados com o programa CITATION para a potência de 4,0 MW por fatores de 1,125 e 1,250.

TABELA 17 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al , com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 42,5\%$). Canaletas 1, 2 e 3 do estojo. (4 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)		v	Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)	
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)		$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 1 Φ.Σ _f (fissões/cm3.s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 2 Φ.Σ _f (fissões/cm3.s)		
60,19	3,16800E+13	2,85598E-03	3,08000E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	3,70809E+10	3,88271E-02	1,19587E+12	1,23296E+12	
61,37	3,32380E+13	2,85598E-03	2,95060E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	3,89045E+10	3,88271E-02	1,14563E+12	1,18454E+12	
62,55	3,42270E+13	2,85598E-03	2,89420E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,00621E+10	3,88271E-02	1,12373E+12	1,16380E+12	
63,73	3,48440E+13	2,85598E-03	2,87280E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,07843E+10	3,88271E-02	1,11542E+12	1,15621E+12	
64,91	3,51700E+13	2,85598E-03	2,86820E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,11659E+10	3,88271E-02	1,11364E+12	1,15480E+12	
66,09	3,52340E+13	2,85598E-03	2,87270E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,12408E+10	3,88271E-02	1,11539E+12	1,15663E+12	
67,27	3,50350E+13	2,85598E-03	2,88640E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,10079E+10	3,88271E-02	1,12071E+12	1,16171E+12	
68,45	3,45360E+13	2,85598E-03	2,91680E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,04238E+10	3,88271E-02	1,13251E+12	1,17293E+12	
69,63	3,36470E+13	2,85598E-03	2,98230E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	3,93833E+10	3,88271E-02	1,15794E+12	1,19732E+12	
70,81	3,21650E+13	2,85598E-03	3,12120E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	3,76486E+10	3,88271E-02	1,21187E+12	1,24952E+12	
Médias	65,50	3,39776E+13	2,85598E-03	2,94452E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	3,97702E+10	3,88271E-02	1,14327E+12	1,18304E+12

TABELA 18 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al , com $3,1 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 27\%$). Canaletas 4 e 5 do estojo. (4 MW).

	Grupo 1 (rápidos)			Grupo 2 (térmicos)			Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total
	Z	Φ	$\nu \cdot \Sigma_f$	Φ	$\nu \cdot \Sigma_f$	ν	$\bar{\Sigma}_f$	Grupo 1	$\bar{\Sigma}_f$	Grupo 2	Grupo 1 + Grupo 2
	(cm)	(n/cm ² .s)	(cm ⁻¹)	(n/cm ² .s)	(cm ⁻¹)		(cm ⁻¹)	$\Phi \cdot \bar{\Sigma}_f$ (fissões/cm3.s)	(cm ⁻¹)	$\Phi \cdot \bar{\Sigma}_f$ (fissões/cm3.s)	(fissões/cm ³ .s)
	60,19	3,71860E+13	1,83139E-03	3,33560E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	2,79107E+10	2,68225E-02	8,94693E+11	9,22603E+11
	61,37	3,89160E+13	1,83139E-03	3,17520E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	2,92092E+10	2,68225E-02	8,51669E+11	8,80878E+11
	62,55	4,00310E+13	1,83139E-03	3,10360E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,00461E+10	2,68225E-02	8,32464E+11	8,62510E+11
	63,73	4,07300E+13	1,83139E-03	3,07570E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,05707E+10	2,68225E-02	8,24981E+11	8,55552E+11
	64,91	4,11050E+13	1,83139E-03	3,06930E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,08522E+10	2,68225E-02	8,23264E+11	8,54116E+11
	66,09	4,11900E+13	1,83139E-03	3,07490E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,09160E+10	2,68225E-02	8,24766E+11	8,55682E+11
	67,27	4,09820E+13	1,83139E-03	3,09270E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,07598E+10	2,68225E-02	8,29541E+11	8,60301E+11
	68,45	4,04390E+13	1,83139E-03	3,13180E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,03523E+10	2,68225E-02	8,40028E+11	8,70381E+11
	69,63	3,94610E+13	1,83139E-03	3,21500E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	2,96182E+10	2,68225E-02	8,62345E+11	8,91963E+11
	70,81	3,78400E+13	1,83139E-03	3,38790E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	2,84016E+10	2,68225E-02	9,08721E+11	9,37122E+11
Médias	65,50	3,97880E+13	1,83139E-03	3,16617E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	2,98637E+10	2,68225E-02	8,49247E+11	8,79111E+11

TABELA 19 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8-Al , com $3,2 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 45,7\%$). Canaletas 6, 7 e 8 do estojo. (4 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)		ν	Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)		$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 1 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 2 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	
60,19	4,34030E+13	1,80113E-03	3,61180E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,20387E+10	2,64023E-02	9,53600E+11	9,85638E+11
61,37	4,51790E+13	1,80113E-03	3,44450E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,33497E+10	2,64023E-02	9,09428E+11	9,42778E+11
62,55	4,63470E+13	1,80113E-03	3,37180E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,42119E+10	2,64023E-02	8,90234E+11	9,24446E+11
63,73	4,70960E+13	1,80113E-03	3,34480E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,47648E+10	2,64023E-02	8,83105E+11	9,17870E+11
64,91	4,75100E+13	1,80113E-03	3,33970E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,50704E+10	2,64023E-02	8,81759E+11	9,16829E+11
66,09	4,76200E+13	1,80113E-03	3,34660E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,51516E+10	2,64023E-02	8,83581E+11	9,18732E+11
67,27	4,74220E+13	1,80113E-03	3,36560E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,50054E+10	2,64023E-02	8,88597E+11	9,23602E+11
68,45	4,68780E+13	1,80113E-03	3,40660E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,46038E+10	2,64023E-02	8,99422E+11	9,34026E+11
69,63	4,58940E+13	1,80113E-03	3,49360E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,38775E+10	2,64023E-02	9,22392E+11	9,56269E+11
70,81	4,42700E+13	1,80113E-03	3,67650E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,26787E+10	2,64023E-02	9,70682E+11	1,00336E+12
Médias	65,50	4,61619E+13	1,80113E-03	3,44015E+13	6,44217E-02	7,38168E-04	3,40752E+10	2,64023E-02	9,08280E+11	9,42355E+11

TABELA 20 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8-Al , com $2,3 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 33\%$). Canaletas 9 e 10 do estojo. (4 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)		ν	Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)		$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 1 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 2 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	
60,19	5,01720E+13	1,41640E-03	3,87670E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	2,91244E+10	2,14894E-02	8,33081E+11	8,62205E+11
61,37	5,18380E+13	1,41640E-03	3,73590E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,00915E+10	2,14894E-02	8,02823E+11	8,32915E+11
62,55	5,29930E+13	1,41640E-03	3,67840E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,07620E+10	2,14894E-02	7,90467E+11	8,21229E+11
63,73	5,37660E+13	1,41640E-03	3,66000E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,12107E+10	2,14894E-02	7,86513E+11	8,17724E+11
64,91	5,42110E+13	1,41640E-03	3,65940E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,14690E+10	2,14894E-02	7,86384E+11	8,17853E+11
66,09	5,43490E+13	1,41640E-03	3,66780E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,15491E+10	2,14894E-02	7,88189E+11	8,19738E+11
67,27	5,41780E+13	1,41640E-03	3,68510E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,14499E+10	2,14894E-02	7,91907E+11	8,23357E+11
68,45	5,36680E+13	1,41640E-03	3,72030E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,11538E+10	2,14894E-02	7,99471E+11	8,30625E+11
69,63	5,27540E+13	1,41640E-03	3,79490E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,06233E+10	2,14894E-02	8,15502E+11	8,46126E+11
70,81	5,12980E+13	1,41640E-03	3,95400E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	2,97781E+10	2,14894E-02	8,49692E+11	8,79470E+11
Médias	65,50	5,29227E+13	1,41640E-03	3,74325E+13	5,24342E-02	5,80492E-04	3,07212E+10	2,14894E-02	8,04403E+11	8,35124E+11

TABELA 21 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al , com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 42,5\%$). Canaletas 1, 2 e 3 do estojo. (4,5 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)			Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total	
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	ν	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 1 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 2 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)	
60,19	3,56400E+13	2,85598E-03	3,46500E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,17160E+10	3,88271E-02	1,34536E+12	1,38707E+12	
61,37	3,73928E+13	2,85598E-03	3,31943E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,37676E+10	3,88271E-02	1,28884E+12	1,33260E+12	
62,55	3,85054E+13	2,85598E-03	3,25598E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,50699E+10	3,88271E-02	1,26420E+12	1,30927E+12	
63,73	3,91995E+13	2,85598E-03	3,23190E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,58824E+10	3,88271E-02	1,25485E+12	1,30074E+12	
64,91	3,95663E+13	2,85598E-03	3,22673E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,63116E+10	3,88271E-02	1,25284E+12	1,29916E+12	
66,09	3,96383E+13	2,85598E-03	3,23179E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,63959E+10	3,88271E-02	1,25481E+12	1,30120E+12	
67,27	3,94144E+13	2,85598E-03	3,24720E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,61339E+10	3,88271E-02	1,26079E+12	1,30693E+12	
68,45	3,88530E+13	2,85598E-03	3,28140E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,54768E+10	3,88271E-02	1,27407E+12	1,31955E+12	
69,63	3,78529E+13	2,85598E-03	3,35509E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,43062E+10	3,88271E-02	1,30268E+12	1,34699E+12	
70,81	3,61856E+13	2,85598E-03	3,12120E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,23547E+10	3,88271E-02	1,21187E+12	1,25423E+12	
Médias	65,50	3,82248E+13	2,85598E-03	3,27357E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,47415E+10	3,88271E-02	1,27103E+12	1,31577E+12

TABELA 22 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al , com $3,1 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 27\%$). Canaletas 4 e 5 do estojo. (4,5 MW).

	Grupo 1 (rápidos)			Grupo 2 (térmicos)			Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total
	Z	Φ	$\nu \cdot \Sigma_f$	Φ	$\nu \cdot \Sigma_f$	ν	$\bar{\Sigma}_f$	Grupo 1	$\bar{\Sigma}_f$	Grupo 2	Grupo 1 + Grupo 2
	(cm)	(n/cm ² .s)	(cm ⁻¹)	(n/cm ² .s)	(cm ⁻¹)		(cm ⁻¹)	$\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	(cm ⁻¹)	$\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	(fissões/cm ³ .s)
	60,19	4,18343E+13	1,83139E-03	3,75255E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,13995E+10	2,68225E-02	1,00653E+12	1,03793E+12
	61,37	4,37805E+13	1,83139E-03	3,57210E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,28603E+10	2,68225E-02	9,58128E+11	9,90988E+11
	62,55	4,50349E+13	1,83139E-03	3,49155E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,38018E+10	2,68225E-02	9,36522E+11	9,70324E+11
	63,73	4,58213E+13	1,83139E-03	3,46016E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,43920E+10	2,68225E-02	9,28104E+11	9,62496E+11
	64,91	4,72708E+13	1,83139E-03	3,45296E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,54800E+10	2,68225E-02	9,26172E+11	9,61652E+11
	66,09	4,73685E+13	1,83139E-03	3,45926E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,55534E+10	2,68225E-02	9,27862E+11	9,63415E+11
	67,27	4,61048E+13	1,83139E-03	3,47929E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,46048E+10	2,68225E-02	9,33233E+11	9,67838E+11
	68,45	4,54939E+13	1,83139E-03	3,52328E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,41463E+10	2,68225E-02	9,45032E+11	9,79178E+11
	69,63	4,43936E+13	1,83139E-03	3,61688E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,33205E+10	2,68225E-02	9,70138E+11	1,00346E+12
	70,81	4,25700E+13	1,83139E-03	3,81139E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,19518E+10	2,68225E-02	1,02231E+12	1,05426E+12
Médias	65,50	4,49672E+13	1,83139E-03	3,56194E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,37510E+10	2,68225E-02	9,55403E+11	9,89154E+11

TABELA 23 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8 -Al, com 3,2 gU/cm³ ($V_f = 45\%$). Canaletas 6, 7 e 8 do estojo. (4,5 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)		v	Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)		$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 1 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 2 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)
60,19	4,88284E+13	1,80113E-03	4,06328E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,60435E+10	2,64023E-02	1,07280E+12	1,10884E+12
61,37	5,08264E+13	1,80113E-03	3,87506E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,75184E+10	2,64023E-02	1,02311E+12	1,06063E+12
62,55	5,21404E+13	1,80113E-03	3,79328E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,84884E+10	2,64023E-02	1,00151E+12	1,04000E+12
63,73	5,29830E+13	1,80113E-03	3,76290E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,91104E+10	2,64023E-02	9,93494E+11	1,03260E+12
64,91	5,34488E+13	1,80113E-03	3,75716E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,94542E+10	2,64023E-02	9,91979E+11	1,03143E+12
66,09	5,35725E+13	1,80113E-03	3,76493E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,95455E+10	2,64023E-02	9,94028E+11	1,03357E+12
67,27	5,33498E+13	1,80113E-03	3,78630E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,93811E+10	2,64023E-02	9,99672E+11	1,03905E+12
68,45	5,27378E+13	1,80113E-03	3,83243E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,89293E+10	2,64023E-02	1,01185E+12	1,05078E+12
69,63	5,16308E+13	1,80113E-03	3,93030E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,81122E+10	2,64023E-02	1,03769E+12	1,07580E+12
70,81	4,98038E+13	1,80113E-03	4,13606E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	3,67635E+10	2,64023E-02	1,09202E+12	1,12878E+12
Médias	65,50	5,19321E+13	1,80113E-03	3,87017E+13	6,44217E-02	7,38168E-04	3,83346E+10	2,64023E-02	1,02181E+12	1,06015E+12

TABELA 24 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8 -Al, com 2,3 gU/cm³ ($V_f = 33\%$). Canaletas 9 e 10 do estojo. (4,5 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)		v	Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)		$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 1 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 2 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm3.s)	Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)
60,19	5,64435E+13	1,41640E-03	4,36129E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,27650E+10	2,14894E-02	9,37216E+11	9,69981E+11
61,37	5,83178E+13	1,41640E-03	4,20289E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,38530E+10	2,14894E-02	9,03176E+11	9,37029E+11
62,55	5,96171E+13	1,41640E-03	4,13820E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,46073E+10	2,14894E-02	8,89275E+11	9,23883E+11
63,73	6,04868E+13	1,41640E-03	4,11750E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,51121E+10	2,14894E-02	8,84827E+11	9,19939E+11
64,91	6,09874E+13	1,41640E-03	4,11683E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,54027E+10	2,14894E-02	8,84682E+11	9,20085E+11
66,09	6,11426E+13	1,41640E-03	4,12628E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,54928E+10	2,14894E-02	8,86713E+11	9,22206E+11
67,27	6,09503E+13	1,41640E-03	4,14574E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,53811E+10	2,14894E-02	8,90895E+11	9,26276E+11
68,45	6,03765E+13	1,41640E-03	4,18534E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,50481E+10	2,14894E-02	8,99405E+11	9,34453E+11
69,63	5,93483E+13	1,41640E-03	4,26926E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,44512E+10	2,14894E-02	9,17440E+11	9,51891E+11
70,81	5,77103E+13	1,41640E-03	4,44825E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,35003E+10	2,14894E-02	9,55903E+11	9,89404E+11
Médias	65,50	5,95380E+13	1,41640E-03	4,21116E+13	5,24342E-02	5,80492E-04	3,45613E+10	2,14894E-02	9,04953E+11	9,39515E+11

TABELA 25 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al , com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 42,5\%$). Canaletas 1, 2 e 3 do estojo. (5 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)		v	Grupo 1		Grupo 2		Taxa de Fissões total Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)		$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Taxa de Fissões Grupo 1 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm ³ .s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Taxa de Fissões Grupo 2 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm ³ .s)	
60,19	3,96000E+13	2,85598E-03	3,85000E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,63512E+10	3,88271E-02	1,49484E+12	1,54119E+12
61,37	4,15475E+13	2,85598E-03	3,68825E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,86307E+10	3,88271E-02	1,43204E+12	1,48067E+12
62,55	4,27838E+13	2,85598E-03	3,61775E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	5,00777E+10	3,88271E-02	1,40467E+12	1,45474E+12
63,73	4,35550E+13	2,85598E-03	3,59100E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	5,09804E+10	3,88271E-02	1,39428E+12	1,44526E+12
64,91	4,39625E+13	2,85598E-03	3,58525E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	5,14574E+10	3,88271E-02	1,39205E+12	1,44351E+12
66,09	4,40425E+13	2,85598E-03	3,59088E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	5,15510E+10	3,88271E-02	1,39423E+12	1,44578E+12
67,27	4,37938E+13	2,85598E-03	3,60800E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	5,12599E+10	3,88271E-02	1,40088E+12	1,45214E+12
68,45	4,31700E+13	2,85598E-03	3,64600E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	5,05298E+10	3,88271E-02	1,41564E+12	1,46617E+12
69,63	4,20588E+13	2,85598E-03	3,72788E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,92291E+10	3,88271E-02	1,44743E+12	1,49665E+12
70,81	4,02063E+13	2,85598E-03	3,90150E+13	9,47381E-02	2,44	1,17048E-03	4,70608E+10	3,88271E-02	1,51484E+12	1,56190E+12
Médias	65,50	4,24720E+13	2,85598E-03	3,68065E+13	9,47381E-02	1,17048E-03	4,97128E+10	3,88271E-02	1,42909E+12	1,47880E+12

TABELA 26 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3Si_2-Al , com $3,1 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 27\%$). Canaletas 4 e 5 do estojo. (5 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)		v	Grupo 1		Grupo 2		Taxa de Fissões total Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)		$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Taxa de Fissões Grupo 1 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm ³ .s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Taxa de Fissões Grupo 2 $\Phi \cdot \Sigma_f$ (fissões/cm ³ .s)	
60,19	4,64825E+13	1,83139E-03	4,16950E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,48884E+10	2,68225E-02	1,11837E+12	1,15325E+12
61,37	4,86450E+13	1,83139E-03	3,96900E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,65115E+10	2,68225E-02	1,06459E+12	1,10110E+12
62,55	5,00388E+13	1,83139E-03	3,87950E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,75576E+10	2,68225E-02	1,04058E+12	1,07814E+12
63,73	5,09125E+13	1,83139E-03	3,84463E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,82134E+10	2,68225E-02	1,03123E+12	1,06944E+12
64,91	5,13813E+13	1,83139E-03	3,83663E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,85652E+10	2,68225E-02	1,02908E+12	1,06765E+12
66,09	5,14875E+13	1,83139E-03	3,84363E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,86450E+10	2,68225E-02	1,03096E+12	1,06960E+12
67,27	5,12275E+13	1,83139E-03	3,86588E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,84498E+10	2,68225E-02	1,03693E+12	1,07538E+12
68,45	5,05488E+13	1,83139E-03	3,91475E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,79404E+10	2,68225E-02	1,05004E+12	1,08798E+12
69,63	4,93263E+13	1,83139E-03	4,01875E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,70228E+10	2,68225E-02	1,07793E+12	1,11495E+12
70,81	4,73000E+13	1,83139E-03	4,23488E+13	6,54470E-02	2,44	7,50570E-04	3,55019E+10	2,68225E-02	1,13590E+12	1,17140E+12
Médias	65,50	4,97350E+13	1,83139E-03	3,95771E+13	6,54470E-02	7,50570E-04	3,73296E+10	2,68225E-02	1,06156E+12	1,09889E+12

TABELA 27 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8-Al , com $3,2 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 45\%$). Canaletas 6, 7 e 8 do estojo. (5 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)		v	Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)		$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 1 $\Phi \cdot \bar{\Sigma}_f$ (fissões/cm ³ .s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 2 $\Phi \cdot \bar{\Sigma}_f$ (fissões/cm ³ .s)	
60,19	5,42538E+13	1,80113E-03	4,51475E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,00484E+10	2,64023E-02	1,19200E+12	1,23205E+12
61,37	5,64738E+13	1,80113E-03	4,30563E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,16871E+10	2,64023E-02	1,13679E+12	1,17847E+12
62,55	5,79338E+13	1,80113E-03	4,21475E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,27648E+10	2,64023E-02	1,11279E+12	1,15556E+12
63,73	5,88700E+13	1,80113E-03	4,18100E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,34560E+10	2,64023E-02	1,10388E+12	1,14734E+12
64,91	5,93875E+13	1,80113E-03	4,17463E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,38380E+10	2,64023E-02	1,10220E+12	1,14604E+12
66,09	5,95250E+13	1,80113E-03	4,18325E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,39395E+10	2,64023E-02	1,10448E+12	1,14842E+12
67,27	5,92775E+13	1,80113E-03	4,20700E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,37568E+10	2,64023E-02	1,11075E+12	1,15450E+12
68,45	5,85975E+13	1,80113E-03	4,25825E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,32548E+10	2,64023E-02	1,12428E+12	1,16753E+12
69,63	5,73675E+13	1,80113E-03	4,36700E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,23469E+10	2,64023E-02	1,15299E+12	1,19534E+12
70,81	5,53375E+13	1,80113E-03	4,59563E+13	6,44217E-02	2,44	7,38168E-04	4,08484E+10	2,64023E-02	1,21335E+12	1,25420E+12
Médias	65,50	5,77024E+13	1,80113E-03	4,30019E+13	6,44217E-02	7,38168E-04	4,25940E+10	2,64023E-02	1,13535E+12	1,17794E+12

TABELA 28 - Taxa de fissões nas miniplacas combustíveis de U_3O_8-Al , com $2,3 \text{ gU/cm}^3$ ($V_f = 33\%$). Canaletas 9 e 10 do estojo. (5 MW).

Z (cm)	Grupo 1 (rápidos)		Grupo 2 (térmicos)		v	Grupo 1	Taxa de Fissões	Grupo 2	Taxa de Fissões	Taxa de Fissões total Grupo 1 + Grupo 2 (fissões/cm ³ .s)
	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)	Φ (n/cm ² .s)	$\nu \cdot \Sigma_f$ (cm ⁻¹)		$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 1 $\Phi \cdot \bar{\Sigma}_f$ (fissões/cm ³ .s)	$\bar{\Sigma}_f$ (cm ⁻¹)	Grupo 2 $\Phi \cdot \bar{\Sigma}_f$ (fissões/cm ³ .s)	
60,19	6,27150E+13	1,41640E-03	4,84588E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,64055E+10	2,14894E-02	1,04135E+12	1,07776E+12
61,37	6,47975E+13	1,41640E-03	4,66988E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,76144E+10	2,14894E-02	1,00353E+12	1,04114E+12
62,55	6,62413E+13	1,41640E-03	4,59800E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,84525E+10	2,14894E-02	9,88084E+11	1,02654E+12
63,73	6,72075E+13	1,41640E-03	4,57500E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,90134E+10	2,14894E-02	9,83141E+11	1,02215E+12
64,91	6,77638E+13	1,41640E-03	4,57425E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,93363E+10	2,14894E-02	9,82980E+11	1,02232E+12
66,09	6,79363E+13	1,41640E-03	4,58475E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,94364E+10	2,14894E-02	9,85236E+11	1,02467E+12
67,27	6,77225E+13	1,41640E-03	4,60638E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,93124E+10	2,14894E-02	9,89884E+11	1,02920E+12
68,45	6,70850E+13	1,41640E-03	4,65038E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,89423E+10	2,14894E-02	9,99339E+11	1,03828E+12
69,63	6,59425E+13	1,41640E-03	4,74363E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,82791E+10	2,14894E-02	1,01938E+12	1,05766E+12
70,81	6,41225E+13	1,41640E-03	4,94250E+13	5,24342E-02	2,44	5,80492E-04	3,72226E+10	2,14894E-02	1,06211E+12	1,09934E+12
Médias	65,50	6,61534E+13	1,41640E-03	4,67906E+13	5,24342E-02	5,80492E-04	3,84015E+10	2,14894E-02	1,00550E+12	1,04391E+12

Para o cálculo da concentração de ^{235}U presente em cada miniplaca, levou-se em conta a massa inicial de ^{235}U (em gramas) de cada tipo de miniplaca e o volume do briquete. As concentrações em massa de ^{235}U e de átomos de ^{235}U por unidade de volume do briquete são apresentados na TAB. 29.

TABELA 29 - Concentrações iniciais de ^{235}U nas miniplacas.

Miniplaca Combustível	Massa ^{235}U (g)	Volume briquete (cm^3)	Concentração em massa de ^{235}U no briquete ($\text{g } ^{235}\text{U}/\text{cm}^3$)	Concentração de ^{235}U no briquete (átomos de $^{235}\text{U}/\text{cm}^3$)
$\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ (4,8 gU/cm^3)	3,22	3,36	0,958	$2,46 \times 10^{21}$
$\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ (3,1 gU/cm^3)	2,07	3,36	0,616	$1,58 \times 10^{21}$
$\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ (3,2 gU/cm^3)	2,14	3,36	0,637	$1,63 \times 10^{21}$
$\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ (2,3 gU/cm^3)	1,54	3,36	0,455	$1,17 \times 10^{21}$

Para relacionar as concentrações iniciais de ^{235}U com os parâmetros fornecidos pelo programa CITATION, as concentrações de ^{235}U foram homogeneizadas nos volumes considerados na modelagem tridimensional do núcleo. Para o DIM foi considerado um volume total $V_T = 246,384 \text{ cm}^3$. Esse volume total foi modelado em quatro volumes parciais (V_p) proporcionais ao número de miniplacas de cada tipo no DIM:

- $V_{p1} = 73,915 \text{ cm}^3$ (3/10 de V_T), para 03 miniplacas $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ (4,8 gU/cm^3)
- $V_{p2} = 49,277 \text{ cm}^3$ (2/10 de V_T), para 02 miniplacas $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ (3,1 gU/cm^3)
- $V_{p3} = 73,915 \text{ cm}^3$ (3/10 de V_T), para 03 miniplacas $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ (3,2 gU/cm^3)
- $V_{p4} = 49,277 \text{ cm}^3$ (2/10 de V_T), para 02 miniplacas $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ (2,3 gU/cm^3)

A concentração de ^{235}U homogeneizada foi obtida pela divisão da massa de ^{235}U referente a cada conjunto de miniplacas relacionados na TAB. 9 por cada um dos respectivos volumes parciais, sendo os valores apresentados na TAB. 30.

TABELA 30 - Concentrações de ^{235}U homogeneizadas nas miniplacas.

Miniplaca Combustível	Concentração (homogeneizada) de ^{235}U no briquete (átomos de $^{235}\text{U}/\text{cm}^3$)
$\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ (4,8 gU/cm^3)	$3,344 \times 10^{20}$
$\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ (3,1 gU/cm^3)	$2,157 \times 10^{20}$
$\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ (3,2 gU/cm^3)	$2,223 \times 10^{20}$
$\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ (2,3 gU/cm^3)	$1,601 \times 10^{20}$

Finalmente, os tempos de irradiação (em segundos) para se alcançar as queimas de 50% e 80% de ^{235}U foram obtidos dividindo-se as concentrações homogeneizadas de ^{235}U , presentes nos briquetes de cada dispersão combustível, pelas respectivas taxas de fissão, calculadas anteriormente e relacionadas nas TAB. 17 a 28. Foram feitos os cálculos para cada tipo de composto utilizado como combustível e concentração de urânio presente nas miniplacas, considerando os casos de operação do reator nas potências nominais de 4,0 MW, 4,5 MW e 5,0 MW, com 62 horas semanais e 45 semanas por ano, como também o caso de operação a 5,0 MW, com 120 horas semanais e 45 semanas por ano. Os tempos de irradiação obtidos são apresentados no Apêndice B (TAB. 32 a 34) e representados nas FIG. 44 a 47.

FIGURA 44 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na pos. 36, operação a 4,0 MW, 62 h/sem e 45 semanas/ano).

FIGURA 45 - Duração irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U , (DIM na pos. 36, operação a 4,5 MW, 62 h/sem e 45 semanas/ano).

FIGURA 46 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U , (DIM na pos. 36, operação a 5,0 MW, 62 h/sem e 45 semanas/ano).

FIGURA 47 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U , (DIM na pos. 36, operação a 5,0 MW, 120 h/sem e 45 semanas/ano).

5.5. Estimativa da atividade da miniplaca após a irradiação

A atividade de cada miniplaca combustível após alcançar a queima estabelecida para os testes de irradiação pode ser calculada com base na atividade do ^{137}Cs presente na mesma. A queima do combustível é a razão entre o número de átomos de ^{235}U fissionados e o número de átomos de ^{235}U existentes antes da irradiação (Terremoto et al., 2000):

$$\Delta U = \frac{N_f^U}{N_0^U} \Rightarrow \Delta U = \frac{N_0^{Cs}}{y_{Cs} \cdot N_0^U} \cdot f \quad (5.1)$$

e

$$N_0^{Cs} = \frac{y_{Cs} \cdot \Delta U \cdot N_0^U}{f} = \frac{y_{Cs} \cdot N_f^U}{f} \quad (5.2)$$

onde:

ΔU = Queima do combustível

N_f^U = Número de átomos de ^{235}U fissionados

N_0^U = Número de átomos de ^{235}U existentes antes da irradiação

N_0^{Cs} = Número de átomos de ^{137}Cs na miniplaca ao final da irradiação

$y_{(\text{Cs})} = \text{yield}$ = rendimento de produção do radionuclídeo (^{137}Cs) na fissão

f = fator de correção que leva em conta o decaimento do radionuclídeo ocorrido durante o período de irradiação, que é dado pela seguinte expressão (Bibichev et al., 1979):

$$f = \frac{\lambda \cdot \sum_{k=1}^n P_k \cdot t_k}{\sum_{k=1}^n P_k \cdot e^{-\lambda \tau_k} (1 - e^{-\lambda t_k})} \quad (5.3)$$

onde λ é a constante de decaimento do radioinúclídeo (^{137}Cs), P_k é a potência média relativa correspondente ao k -ésimo período de irradiação (sendo $\sum_{k=1}^n P_k = 1$), n é o número total de períodos de irradiação durante o histórico inteiro de irradiação da miniplaca, t_k é a duração do k -ésimo período de irradiação e τ_k é o intervalo de tempo (em segundos) entre o final do k -ésimo período de irradiação e o fim do último período de irradiação, conforme indicado na FIG. 48.

FIGURA 48 - Esquema representativo dos períodos de irradiação das miniplacas.

A partir do esquema mostrado na FIG. 48, é possível deduzir a seguinte relação de recorrência para τ_k :

$$\tau_k = T - k \cdot (t_{\text{irrad}}) - (k - 1) \cdot (t_{\text{intervalo}}) \quad (5.4)$$

Conforme calculado no item anterior, para o caso da irradiação das miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($4,8 \text{ gU/cm}^3$), montadas no DIM na sua configuração 1 e com o reator na

potência de 5,0 MW e escala de irradiação de 62 horas/semana, 45 semanas por ano, a duração da irradiação para se alcançar 50% da queima dos átomos iniciais de ^{235}U será de 508 semanas ($\sim 11,3$ anos). Assim,

$$n = 508 \text{ períodos}$$

$$\text{Cada período} = 8,11 \text{ d} = 194,64 \text{ h} = (62 \text{ h irrad.} + 132,64 \text{ h de intervalo})$$

$$T = \text{duração da irradiação} = 98877,12 \text{ h}$$

Substituindo os valores na expressão (5.4) para o termo τ_k , vem:

$$\tau_k = 98877,12 - k.62 - (k - 1) \cdot 132,64$$

$$\tau_k = 98877,12 - k.62 - k.132,64 + 132,64$$

$$\tau_k = 98877,12 + 132,64 - k(62 + 132,64)$$

$$\tau_k = 99009,76 - k(194,64) \quad (\text{em horas})$$

$$\tau_k = 356435136 - k(700704) \quad (\text{em segundos})$$

Substituindo os valores de τ_k no termo exponencial do denominador da expressão (5.3), vem:

$$e^{-\lambda \tau_k} = e^{-\lambda(356435136 - k.700704)} \quad \rightarrow \quad e^{-\lambda \tau_k} = e^{-\lambda.356435136} \cdot e^{\lambda.k.700704}$$

Substituindo os demais parâmetros na expressão (5.3), temos:

$$f = \frac{n.\lambda.P_k.t_k}{P_k.(1 - e^{-\lambda t_k})e^{-\lambda.356435136} \cdot \sum_{k=1}^n e^{\lambda.k.700704}} \quad (5.5)$$

$$f = \frac{\lambda.223200}{(1/508).(1 - e^{-\lambda.223200})e^{-\lambda.356435136} \cdot \sum_{k=1}^{508} e^{\lambda.k.700704}} \quad (5.6)$$

$$f = \frac{\lambda.223200.508}{(1 - e^{-\lambda.223200})e^{-\lambda.356435136} \cdot \sum_{k=1}^{508} e^{\lambda.k.700704}} \quad (5.7)$$

Constante de decaimento para $^{137}\text{Cs} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$

sendo $T_{1/2} (^{137}\text{Cs}) = 30,14 \text{ anos} \rightarrow \lambda = 7,292 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$.

substituindo na expressão (5.7) vem:

$$f = \frac{0,083}{1,628 \cdot 10^{-4} \cdot 0,771 \cdot \sum_{k=1}^{508} e^{k \cdot 5,110 \cdot 10^{-4}}} \quad (5.8)$$

e, portanto:

$$f = \frac{661,255}{\sum_{k=1}^{508} e^{k \cdot 5,110 \cdot 10^{-4}}} \quad (5.9)$$

O cálculo da somatória para 508 ciclos referente ao denominador da expressão (5) foi feito utilizando uma planilha do MS-Excel, sendo obtido o valor 580,371.

$$f = \frac{661,255}{580,371} = 1,135$$

$$\left(1 - \frac{1}{f}\right) = \left(1 - \frac{1}{1,135}\right) = 1 - 0,881 = 0,119 \rightarrow \text{diminuição de } 11,9 \%$$

Significa que ocorre uma diminuição de 11,9% na quantidade de ^{137}Cs produzida por fissão na miniplaca ao longo da irradiação, em função do decaimento desse radionuclídeo.

A atividade A , em bequeréis (decaimentos por segundo), é dada pela expressão:

$$A = N_0^{Cs} \cdot \lambda_{Cs} \quad (5.10)$$

onde N_0^{Cs} é obtido pela expressão (5.2), utilizando os seguintes valores:

- $\Delta U = 0,50$ (50% queima de ^{235}U)
- $y_{^{137}\text{Cs}} = (\text{rendimento de produção do } ^{137}\text{Cs na fissão do } ^{235}\text{U}) = (6,21 \pm 0,03)\%$

$$N_0^{Cs} = \frac{0,50 \times 0,062 \times 8,250 \times 10^{21}}{1,135} = 2,256 \times 10^{20} \text{ átomos de } ^{137}\text{Cs}$$

A massa de ^{137}Cs é dada por:

$$M(^{137}\text{Cs}) = [\text{No}(^{137}\text{Cs}) \times 137] / 6,023 \times 10^{23} \quad (5.11)$$

Finalmente, a atividade (em bequeréis) do ^{137}Cs presente na miniplaca ao final da irradiação é:

$$A = (2,256 \times 10^{20}) \cdot 7,292 \times 10^{-10} \rightarrow A = 1,645 \times 10^{11} \text{ Bq (decaimentos por segundo)}$$

$$\text{e considerando que} \quad 1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$A = 4,446 \text{ Ci} \rightarrow$ Atividade de cada miniplaca de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($4,8 \text{ gU/cm}^3$), imediatamente após o último período de irradiação.

De maneira análoga foram calculados os fatores de correção f e as atividades das demais miniplacas no final da irradiação. Na TAB. 31 estão sumarizados os fatores de correção f e as estimativas da quantidade de ^{137}Cs e da atividade deste radionuclídeo em cada miniplaca, ao final da irradiação. Nessa tabela, os tempos considerados de irradiação são aqueles obtidos para o caso da montagem das miniplacas no DIM conforme a configuração 1 (Vide FIG. 41).

TABELA 31 - Estimativa da quantidade de ^{137}Cs e atividade das miniplacas combustíveis ao final dos períodos de queimas de 50% e 80% do ^{235}U inicial.

Miniplaca	Queima ^{235}U (%) ΔU	Imediatamente após o último período de irradiação			
		f	$\text{N}_0(^{137}\text{Cs})$	$M(^{137}\text{Cs}) \text{ (g)}$	$A \text{ (Ci)}$
$\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($4,8 \text{ gU/cm}^3$)	50%	1,135	$2,256\text{E}+20$	0,051	4,446
	80%	1,220	$3,358\text{E}+20$	0,076	6,619
$\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($3,1 \text{ gU/cm}^3$)	50%	1,117	$1,474\text{E}+20$	0,033	2,905
	80%	1,189	$2,2164\text{E}+20$	0,050	4,367
$\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ ($3,2 \text{ gU/cm}^3$)	50%	1,112	$1,531\text{E}+20$	0,035	3,018
	80%	1,181	$2,305\text{E}+20$	0,052	4,544
$\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ ($2,3 \text{ gU/cm}^3$)	50%	1,089	$1,125\text{E}+20$	0,026	2,217
	80%	1,146	$1,710\text{E}+20$	0,039	3,370

6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

6.1. *Discussão*

Das FIG. 44 a 47 (e TAB. 32 a 35 do Apêndice B) pode-se verificar que os tempos de irradiação para se alcançar as queimas de 50% e 80% da quantidade inicial de ^{235}U das miniplacas combustíveis em testes são bastante longos. Esta limitação é consequência principalmente dos baixos fluxos de nêutrons existentes no reator IEA-R1. As miniplacas começaram a ser irradiadas em junho/2011, com o reator sendo operado a 4,0 MW. A partir de agosto/2011, a potência do reator foi elevada a 4,5 MW, devendo manter essa potência nominal até o início de 2012. A partir de 2012, existe previsão de que o reator passará a ser operado normalmente a 5,0 MW. Nessa potência, os fluxos de nêutrons (rápidos e térmicos) máximos no DIM totalizam $6,6 \times 10^{13}$ e $4,7 \times 10^{13}$ n/cm².s, respectivamente. O fluxo máximo de nêutrons térmicos, importante para o processo de fissão, é baixo se comparado àqueles existentes em alguns dos reatores estrangeiros (de alto fluxo de nêutrons) que conduzem normalmente testes de irradiação em combustíveis, como por exemplo: (a) o HFR (*High Flux Reactor*, Petten, Holanda) com fluxo de nêutrons térmicos de 3×10^{14} n/cm².s e 10 ciclos anuais de irradiação, sendo que cada ciclo tem a duração de 31,5 dias, com 28 dias (672 horas) a plena potência para irradiação (JRC, 2005) e, (b) o BR2 (*Belgian Reactor 2*, do Instituto SCK.CEN, da Bélgica) com fluxo de nêutrons térmicos de 1×10^{15} n/cm².s e 10 ciclos/ano de operação contínuos de 22 dias, em média (Leenaers et al., 2008). Fluxos de nêutrons dessas magnitudes permitem que testes de irradiação de combustíveis sejam concluídos em apenas alguns meses.

Algumas alternativas para a diminuição dos tempos de irradiação das miniplacas no reator IEA-R1, mais especificamente aquelas contendo siliceto de alta densidade, são: (i) remanejamento (inversão da ordem) das miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) no estojo do DIM, das atuais 8^a, 9^a e 10^a para as 1^a, 2^a e 3^a canaletas, de maneira que estas miniplacas fiquem expostas a fluxos de nêutrons mais intensos; (ii) troca da posição atual do DIM (posição 36) que se encontra fora do núcleo ativo, para alguma posição interna ao arranjo do núcleo, com maior densidade de potência e (iii) aumento do número de horas na escala semanal de irradiação do reator. Qualquer alternativa que

proporcione aumento no fluxo de nêutrons térmicos na região do DIM ou aumento da quantidade de horas semanais de irradiação contribuirá para a diminuição no tempo de duração da irradiação, de maneira diretamente proporcional.

A alternativa (i) consiste em remanejar as miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) no estojo do DIM de maneira que estas fiquem posicionadas junto ao núcleo, expostas a maiores fluxos locais de nêutrons rápidos e térmicos, o que reduz consideravelmente ($\sim 17,7\%$) os tempos calculados para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U . O Apêndice C apresenta nas TAB. 36 a 39 os fluxos de nêutrons calculados pelo programa CITATION para o caso de remanejamento das miniplacas no estojo do DIM para a configuração 2, mostrada na FIG. 49. Os tempos de irradiação calculados para alcançar as queimas de 50% e 80% podem ser vistos nas TAB. 40 e 41. Nota-se que com o remanejamento para a configuração 2 ocorre maior uniformização dos tempos de irradiação para os tipos de combustível e concentrações de urânio em relação aos tempos de irradiação obtidos da configuração 1. Para a alternativa (ii), a posição ideal, sob o ponto de vista da irradiação das miniplacas, é a posição central do núcleo (posição 65 da placa matriz) ocupada atualmente pelo EIBe (Elemento de Irradiação de Berílio). Os parâmetros neutrônicos para esta posição central foram calculados pelo programa CITATION e estão sumarizados no Apêndice D (vide TAB. 42 a 45). O remanejamento do DIM para esta posição permitiria alcançar as queimas desejadas para as miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) em menores prazos, respectivamente de 4,2 e 6,6 anos (vide TAB. 46). A densidade de potência máxima obtida nas miniplacas de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ com $4,8 \text{ gU/cm}^3$, na configuração 2, para o caso do DIM montado na posição 65 foi de $130,8 \text{ W/cm}^3$. Com a vazão de $13 \text{ m}^3/\text{h}$ estabelecida pela PLV, as temperaturas máximas no revestimento dessas miniplacas são inferiores ao limite de 95°C estabelecido. Esta alternativa leva à necessidade de realocação do EIBe para outra posição da placa matriz, com impactos nas irradiações que são realizadas neste dispositivo. Finalmente, a alternativa (iii) considera um aumento da escala semanal de operação do reator das atuais 62 horas para 120 horas (Domingos, 2010), que viria a reduzir praticamente pela metade a duração da irradiação. Esta alternativa, no entanto, requer a adequação das equipes de operação do IEA-R1. Uma combinação das alternativas (i)+(ii)+(iii) permitiria reduzir consideravelmente as durações das irradiações para períodos de 2,2 anos (50% de queima) e 3,4 anos (80% queima), conforme pode ser visto no Apêndice D, TAB. 47. Estas alternativas deverão ser avaliadas pela Instituição, em função da necessidade de qualificação do $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) para uso no RMB.

Por ocasião da primeira campanha de END das miniplacas irradiadas, prevista para o segundo trimestre de 2012, será feito o remanejamento das miniplacas no estojo do DIM da atual configuração 1 para a configuração 2, providência relativa à alternativa (i) descrita.

Como discutido, a irradiação das miniplacas poderá se estender por períodos relativamente longos. Isto poderá acarretar a formação de sucessivas e espessas camadas de óxidos sobre o revestimento das miniplacas, levando, conseqüentemente, a um maior consumo da espessura do revestimento de alumínio. Adicionalmente, se for mantido o atual ciclo de operação do reator IEA-R1 (62 horas/semana de irradiação, seguido de desligamento), aos longos tempos de irradiação estarão associados, também, números relativamente elevados de ciclos térmicos (de aquecimento e resfriamento) das miniplacas. Outro aspecto é relativo ao fluxo integrado de nêutrons (rápidos) ao longo da irradiação, onde é esperado um aumento das tensões de escoamento e de ruptura com diminuição na ductilidade do material do revestimento. As tensões devido às expansões térmicas diferenciais na interface revestimento-cerne podem influenciar na formação de trincas no revestimento por fadiga térmica. Quando uma miniplaca é irradiada numa instalação com altos fluxos de nêutrons e com regimes de várias semanas de irradiação ininterrupta, como nos casos dos reatores de alto fluxo (HFR e BR2) já citados, o número de ciclos de aquecimento/resfriamento das miniplacas, ao longo de toda a irradiação, é pequeno, normalmente da ordem de ou inferior a 10 ciclos (uma vez que os testes de irradiação são realizados em períodos normalmente menores que um ano). No Anexo C, TAB. 49, são relacionados EC que foram utilizados no núcleo do IEA-R1 (operado na maior parte do tempo nas potências de 2,0 e 3,5 MW) ao longo de períodos superiores a cinco anos, sem apresentar problemas de desempenho. Podem ser destacados os EC 155 e 157 que foram utilizados por mais de 10 anos (~450 ciclos térmicos de aquecimento/resfriamento). O histórico de bom comportamento sob irradiação desses EC, o emprego dos mesmos materiais e processos tecnológicos de fabricação e as mesmas condições gerais de irradiação, constituem indicativos da não ocorrência de problemas de desempenho nas miniplacas combustíveis devido às ciclagens térmicas.

Fica evidenciada a importância do acompanhamento periódico das condições gerais das miniplacas ao longo do período de irradiação e também durante o armazenamento destas na piscina. A análise dos resultados obtidos pela aplicação das técnicas não destrutivas no acompanhamento das condições gerais das miniplacas poderá

fornecer subsídios importantes para recomendar, ou não, a continuidade da irradiação das mesmas no reator IEA-R1.

Fica também evidenciada a necessidade de se ter no País um reator de pesquisas e testes de materiais com altos fluxos de nêutrons ($>10^{14}$ n/cm².s) e ciclos de operação mais longos, para que possam ser alavancadas tanto a produção de radioisótopos para uso na medicina nuclear como também a realização de pesquisas tecnológicas de combustíveis e materiais estruturais, de uso nas várias áreas da engenharia, em tempos razoáveis. Essas são algumas das funções que deverão ser cumpridas pelo RMB.

6.2. Conclusões

Os métodos não destrutivos estudados contribuem de maneira importante para o processo de qualificação dos combustíveis a dispersão de alta densidade de urânio produzidos no IPEN/CNEN-SP, com benefícios diretos para o mapeamento de uma área sem informação no cenário nacional, trazendo resultados originais no País. A caracterização pós-irradiação mais abrangente desses combustíveis será possível com a realização de PIE, em laboratórios de células quentes.

Considerando para o País um cenário que envolve tanto a fabricação de um importante reator nuclear de pesquisas multipropósito, o RMB, como também uma política energética nacional que considera a construção de diversas centrais nucleares de potência para aproveitamento das nossas reservas de urânio, é de fundamental importância que sejam concluídas as infraestruturas de células quentes iniciadas pela Marinha do Brasil e desenvolvidas as técnicas e os recursos humanos especializados para a realização de PIE de combustíveis nucleares. O uso e o desenvolvimento de novas técnicas não destrutivas para a análise de combustíveis irradiados na piscina do reator deverão ser incentivados.

6.3. Sugestões para desenvolvimentos futuros

São propostos os seguintes temas para aprofundamento e continuidade deste trabalho:

- Continuação dos experimentos de irradiação e análise pós-irradiação das miniplacas;
- Desenvolvimento de infraestrutura para medidas de espessura de camada de óxido sobre as miniplacas e EC irradiados, empregando correntes parasitas, na piscina do reator IEA-R1.

- Adaptação da metodologia de análise, dos componentes mecânicos e equipamentos do sistema de espectrometria de raios-gama existente no reator IEA-R1 para a realização de ensaios para a determinação do perfil de queima de miniplaca combustível irradiada;
- Desenvolvimento de um dispositivo para testes de irradiação de placas combustíveis *full size*, similar ao dispositivo IRIS utilizado no reator Siloé (Fr);
- Desenvolvimento de um dispositivo para desmantelamento subaquático de EC falhado, para possibilitar a realização de exames de caracterização de cada placa combustível e identificação da placa falhada, bem como estabelecer a correlação do tamanho do defeito com a taxa de vazamento.

I APÊNDICES

APÊNDICE A – Ficha de registro de ensaio dimensional de miniplaca irradiada

Ficha de registro de ensaio dimensional	
	Identificação da miniplaca _____	Data: ____/____/____ Por: _____

Medidas de espessura de miniplaca irradiada

Pontos de Medida de Espessura na Miniplaca, conforme FIG. 36

Pontos	Coordenadas		1ª. medida	2ª. medida	3ª. medida	4ª. medida	Média (mm)
	x	y					
1	6	35					
2	16	35					
3	26	35					
4	36	35					
5	46	35					
6	6	55					
7	16	55					
8	26	55					
9	36	55					
10	46	55					
11	6	85					
12	16	85					
13	26	85					
14	36	85					
15	46	85					
16	6	115					
17	16	115					
18	26	115					
19	36	115					
20	46	115					
21	6	135					
22	16	135					
23	26	135					
24	36	135					
25	46	135					

APÊNDICE B - Tempos de irradiação das miniplacas, conforme configuração do carregamento no núcleo do IEA-R1, pos. 36 da placa matriz.

Cálculo dos tempos de irradiação das miniplacas combustíveis conforme montagem da configuração 1, indicada na FIG. 41.

TABELA 32 - Parâmetros de irradiação das miniplacas combustíveis para operação a potência de 4,0 MW (62horas/semana, 45 semanas/ano).

4,0 MW , 50% Queima	Taxa de Fissões total		N _o	Volume homogeneizado	N _o x 0,5	Regime operação do reator 62h/semanais, 45 semanas por ano				Densidade fissões no cerne	Densidade de fissões
	Z		real no cerne	N _o (homog.)	50% át. U-235					50% queima	nas partículas
	(cm)	(fissões/cm ³ .s)	(át. U-235/cm ³)	(át. U-235/cm ³)	fissionados/cm ³)	tempo para se alcançar a queima de 50%				(fissões/cm ³)	combustíveis do cerne
						(s)	(h)	semanas	anos		
U ₃ Si ₂ -Al, 4,8 gU/cm ³	65,50	1,18304E+12	2,45E+21	3,344E+20	1,67E+20	1,414E+08	39287	634	14,1	1,23E+21	2,88E+21
U ₃ Si ₂ -Al, 3,1 gU/cm ³	65,50	8,79111E+11	1,57E+21	2,157E+20	1,08E+20	1,228E+08	34112	550	12,2	7,85E+20	2,86E+21
U ₃ O ₈ -Al, 3,2 gU/cm ³	65,50	9,42355E+11	1,61E+21	2,223E+20	1,11E+20	1,181E+08	32794	529	11,8	8,05E+20	1,76E+21
U ₃ O ₈ -Al, 2,3 gU/cm ³	65,50	8,35124E+11	1,17E+21	1,601E+20	8,01E+19	9,591E+07	26641	430	9,5	5,83E+20	1,77E+21

4,0 MW , 80% Queima	Taxa de Fissões total		N _o	Volume homogeneizado	N _o x 0,8	Regime operação do reator 62h/semanais, 45 semanas por ano				Densidade fissões no cerne	Densidade de fissões nas partículas combustíveis do cerne
	Z		real no cerne	N _o (homog.)	80% át. U-235					80% queima	
	(cm)	(fissões/cm ³ .s)	(át. U-235/cm ³)	(át. U-235/cm ³)	fissionados/cm ³)	tempo para se alcançar a queima de 80%				(fissões/cm ³)	
						(s)	(h)	semanas	anos		
U ₃ Si ₂ -Al, 4,8 gU/cm ³	65,50	1,18304E+12	2,45E+21	3,344E+20	2,68E+20	2,263E+08	62858	1014	22,5	1,96E+21	4,61E+21
U ₃ Si ₂ -Al, 3,1 gU/cm ³	65,50	8,79111E+11	1,57E+21	2,157E+20	1,73E+20	1,965E+08	54579	880	19,6	1,26E+21	4,58E+21
U ₃ O ₈ -Al, 3,2 gU/cm ³	65,50	9,42355E+11	1,61E+21	2,223E+20	1,78E+20	1,889E+08	52470	846	18,8	1,29E+21	2,82E+21
U ₃ O ₈ -Al, 2,3 gU/cm ³	65,50	8,35124E+11	1,17E+21	1,601E+20	1,28E+20	1,535E+08	42626	688	15,3	9,33E+20	2,83E+21

Miniplacas de U₃Si₂-Al, 4,8 gU/cm³
 Miniplacas de U₃Si₂-Al, 3,1 gU/cm³
 Miniplacas de U₃O₈-Al, 3,2 gU/cm³
 Miniplacas de U₃O₈-Al, 2,3 gU/cm³

Canaletas 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a .
Canaletas 4 ^a e 5 ^a .
Canaletas 6 ^a , 7 ^a e 8 ^a .
Canaletas 9 ^a e 10 ^a .

DIM

Lado do núcleo

TABELA 33 - Tempo de irradiação das miniplacas combustíveis para operação a potência de 4,5 MW (62horas/semana, 45 semanas/ano).

4,5 MW , 50% Queima	Taxa de Fissões total		N _o	Volume homogeneizado	N _o x 0,5	Regime operação do reator 62h/semanais, 45 semanas por ano				Densidade fissões no cerne	Densidade de fissões nas partículas combustíveis do cerne
	Z (cm)	(fissões/cm ³ .s)	real no cerne (át. U-235/cm ³)	N _o (homog.) (át. U-235/cm ³)	50% át. U-235 fissionados/cm ³)	tempo para se alcançar a queima de 50%				50% queima (fissões/cm ³)	
						(s)	(h)	semanas	anos		
U ₃ Si ₂ -Al, 4,8 gU/cm ³	65,50	1,31577E+12	2,45E+21	3,34400E+20	1,67E+20	1,27E+08	35320	570	12,7	1,23E+21	2,88E+21
U ₃ Si ₂ -Al, 3,1 gU/cm ³	65,50	9,89154E+11	1,57E+21	2,15700E+20	1,08E+20	1,09E+08	30316	489	10,9	7,85E+20	2,86E+21
U ₃ O ₈ -Al, 3,2 gU/cm ³	65,50	1,06015E+12	1,61E+21	2,22300E+20	1,11E+20	1,05E+08	29150	470	10,4	8,05E+20	1,76E+21
U ₃ O ₈ -Al, 2,3 gU/cm ³	65,50	9,39515E+11	1,17E+21	1,60100E+20	8,01E+19	8,53E+07	23681	382	8,5	5,83E+20	1,77E+21

4,5 MW , 80% Queima	Taxa de Fissões total		N _o	Volume homogeneizado	N _o x 0,8	Regime operação do reator 62h/semanais, 45 semanas por ano				Densidade fissões no cerne	Densidade de fissões nas partículas combustíveis do cerne
	Z (cm)	(fissões/cm ³ .s)	real no cerne (át. U-235/cm ³)	N _o (homog.) (át. U-235/cm ³)	80% át. U-235 fissionados/cm ³)	tempo para se alcançar a queima de 80%				80% queima (fissões/cm ³)	
						(s)	(h)	semanas	anos		
U ₃ Si ₂ -Al, 4,8 gU/cm ³	65,50	1,31577E+12	2,45E+21	3,34400E+20	2,68E+20	2,03E+08	56513	911	20,3	1,96E+21	4,61E+21
U ₃ Si ₂ -Al, 3,1 gU/cm ³	65,50	9,89154E+11	1,57E+21	2,15700E+20	1,73E+20	1,75E+08	48506	782	17,4	1,26E+21	4,58E+21
U ₃ O ₈ -Al, 3,2 gU/cm ³	65,50	1,06015E+12	1,61E+21	2,22300E+20	1,78E+20	1,68E+08	46640	752	16,7	1,29E+21	2,82E+21
U ₃ O ₈ -Al, 2,3 gU/cm ³	65,50	9,39515E+11	1,17E+21	1,60100E+20	1,28E+20	1,36E+08	37890	611	13,6	9,33E+20	2,83E+21

Miniplacas de U₃Si₂-Al, 4,8 gU/cm³
 Miniplacas de U₃Si₂-Al, 3,1 gU/cm³
 Miniplacas de U₃O₈-Al, 3,2 gU/cm³
 Miniplacas de U₃O₈-Al, 2,3 gU/cm³

Canaletas 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a .
Canaletas 4 ^a e 5 ^a .
Canaletas 6 ^a , 7 ^a e 8 ^a .
Canaletas 9 ^a e 10 ^a .

DIM

Lado do núcleo

TABELA 34 - Tempo de irradiação das miniplacas combustíveis para operação a potência de 5,0 MW (62horas/semana, 45 semanas/ano).

5,0 MW , 50% Queima	Taxa de Fissões total		N _o	Volume homogeneizado	N _o x 0,5	Regime operação do reator 62h/semanais, 45 semanas por ano				Densidade fissões no cerne	Densidade de fissões
	Z		real no cerne	N _o (homog.)	50% át. U-235					50% queima	nas partículas
	(cm)	(fissões/cm ³ .s)	(át. U-235/cm ³)	(át. U-235/cm ³)	fissionados/cm ³)	tempo para se alcançar a queima de 50%				(fissões/cm ³)	combustíveis do cerne
						(s)	(h)	semanas	anos		
U ₃ Si ₂ -Al, 4,8 gU/cm ³	65,50	1,47880E+12	2,46E+21	3,34400E+20	1,67E+20	1,13E+08	31429	507	11,3	1,23E+21	2,89E+21
U ₃ Si ₂ -Al, 3,1 gU/cm ³	65,50	1,09889E+12	1,58E+21	2,15700E+20	1,08E+20	9,82E+07	27289	440	9,8	7,90E+20	2,88E+21
U ₃ O ₈ -Al, 3,2 gU/cm ³	65,50	1,17794E+12	1,63E+21	2,22300E+20	1,11E+20	9,44E+07	26235	423	9,4	8,15E+20	1,78E+21
U ₃ O ₈ -Al, 2,3 gU/cm ³	65,50	1,04391E+12	1,17E+21	1,60100E+20	8,01E+19	7,67E+07	21313	344	7,6	5,83E+20	1,77E+21

5,0 MW , 80% Queima	Taxa de Fissões total		N _o	Volume	N _o x 0,8	Regime operação do reator 62h/semanais, 45 semanas por ano				Densidade fissões no	Densidade de fissões nas partículas combustíveis do cerne
	Z		real no cerne	homogeneizado	80% át. U-235					cerne	
	(cm)	(fissões/cm ³ .s)	(át. U-235/cm ³)	N _o (homog.)	(fissionados/cm ³)	tempo para se alcançar a queima de 80%				80% queima	
				(át. U-235/cm ³)		(s)	(h)	semanas	anos	(fissões/cm ³)	
U ₃ Si ₂ -Al, 4,8 gU/cm ³	65,50	1,47880E+12	2,46E+21	3,34400E+20	2,68E+20	1,81E+08	50287	811	18,0	1,97E+21	4,63E+21
U ₃ Si ₂ -Al, 3,1 gU/cm ³	65,50	1,09889E+12	1,58E+21	2,15700E+20	1,73E+20	1,57E+08	43663	704	15,6	1,26E+21	4,61E+21
U ₃ O ₈ -Al, 3,2 gU/cm ³	65,50	1,17794E+12	1,63E+21	2,22300E+20	1,78E+20	1,51E+08	41976	677	15,0	1,30E+21	2,85E+21
U ₃ O ₈ -Al, 2,3 gU/cm ³	65,50	1,04391E+12	1,17E+21	1,60100E+20	1,28E+20	1,23E+08	34101	550	12,2	9,33E+20	2,83E+21

Miniplacas de U₃Si₂-Al, 4,8 gU/cm³
 Miniplacas de U₃Si₂-Al, 3,1 gU/cm³
 Miniplacas de U₃O₈-Al, 3,2 gU/cm³
 Miniplacas de U₃O₈-Al, 2,3 gU/cm³

Canaletas 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a .
Canaletas 4 ^a e 5 ^a .
Canaletas 6 ^a , 7 ^a e 8 ^a .
Canaletas 9 ^a e 10 ^a .

DIM

Lado do núcleo

TABELA 35 - Tempo de irradiação das miniplacas combustíveis para operação a potência de 5,0 MW (120horas/semana, 45 semanas/ano).

5,0 MW , 50% Queima	Taxa de Fissões total		N _o	Volume homogeneizado	N _o x 0,5	Regime operação do reator 120h/semanais, 45 semanas por ano				Densidade fissões no cerne	Densidade de fissões nas partículas combustíveis do cerne
	Z (cm)	(fissões/cm ³ .s)	real no cerne	N _o (homog.)	50% át. U-235	tempo para se alcançar a queima de 50%				50% queima	
			(át. U-235/cm ³)	(át. U-235/cm ³)	fissionados/cm ³	(s)	(h)	semanas	anos	(fissões/cm ³)	
U ₃ Si ₂ -Al, 4,8 gU/cm ³	65,50	1,47880E+12	2,46E+21	3,34400E+20	1,67E+20	1,13E+08	31429	262	5,8	1,23E+21	2,89E+21
U ₃ Si ₂ -Al, 3,1 gU/cm ³	65,50	1,09889E+12	1,58E+21	2,15700E+20	1,08E+20	9,82E+07	27289	227	5,1	7,90E+20	2,88E+21
U ₃ O ₈ -Al, 3,2 gU/cm ³	65,50	1,17794E+12	1,63E+21	2,22300E+20	1,11E+20	9,44E+07	26235	219	4,9	8,15E+20	1,78E+21
U ₃ O ₈ -Al, 2,3 gU/cm ³	65,50	1,04391E+12	1,17E+21	1,60100E+20	8,01E+19	7,67E+07	21313	178	3,9	5,83E+20	1,77E+21
5,0 MW , 80% Queima	Taxa de Fissões total		N _o	Volume homogeneizado	N _o x 0,8	Regime operação do reator 120h/semanais, 45 semanas por ano				Densidade fissões no cerne	Densidade de fissões nas partículas combustíveis do cerne
	Z (cm)	(fissões/cm ³ .s)	real no cerne	N _o (homog.)	80% át. U-235	tempo para se alcançar a queima de 80%				80% queima	
			(át. U-235/cm ³)	(át. U-235/cm ³)	fissionados/cm ³	(s)	(h)	semanas	anos	(fissões/cm ³)	
U ₃ Si ₂ -Al, 4,8 gU/cm ³	65,50	1,47880E+12	2,46E+21	3,34400E+20	2,68E+20	1,81E+08	50287	419	9,3	1,97E+21	4,63E+21
U ₃ Si ₂ -Al, 3,1 gU/cm ³	65,50	1,09889E+12	1,58E+21	2,15700E+20	1,73E+20	1,57E+08	43663	364	8,1	1,26E+21	4,61E+21
U ₃ O ₈ -Al, 3,2 gU/cm ³	65,50	1,17794E+12	1,63E+21	2,22300E+20	1,78E+20	1,51E+08	41976	350	7,8	1,30E+21	2,85E+21
U ₃ O ₈ -Al, 2,3 gU/cm ³	65,50	1,04391E+12	1,17E+21	1,60100E+20	1,28E+20	1,23E+08	34101	284	6,3	9,33E+20	2,83E+21

Miniplacas de U₃Si₂-Al, 4,8 gU/cm³
 Miniplacas de U₃Si₂-Al, 3,1 gU/cm³
 Miniplacas de U₃O₈-Al, 3,2 gU/cm³
 Miniplacas de U₃O₈-Al, 2,3 gU/cm³

Canaletas 1a, 2a e 3a.
Canaletas 4a e 5a.
Canaletas 6a, 7a e 8a.
Canaletas 9a e 10a.

DIM

Lado do núcleo

APÊNDICE C – Estudo de caso: remanejamento das miniplacas no DIM

Remanejamento das miniplacas carregadas no DIM para a configuração 2, indicada na FIG. 49, de maneira a posicionar as miniplacas de U_3Si_2-Al ($4,8 \text{ gU/cm}^3$) junto ao núcleo, com o DIM na posição 36.

FIGURA 49 – Croqui ilustrativo da montagem das miniplacas no DIM - Configuração 2.

TABELA 36 - Fluxos de nêutrons nas miniplacas de U_3Si_2-Al , com $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (10ª, 9ª e 8ª canaletas do estojo). DIM na posição 36. Reator a 5,0 MW.

Malhas	Z (CM)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 ($\text{n/cm}^2.\text{s}$)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 ($\text{n/cm}^2.\text{s}$)
1	1.5000	3.5731E+10	9.4549E+10
2	4.5000	7.5783E+10	2.5859E+11
3	7.5000	1.4469E+11	5.0712E+11
4	10.5000	2.6871E+11	9.3221E+11
5	13.5000	4.9495E+11	1.6730E+12
6	16.5000	9.0880E+11	2.9395E+12
7	19.5000	1.6642E+12	5.0042E+12
8	22.5000	3.0331E+12	8.0547E+12
9	24.8500	4.8911E+12	1.0626E+13
10	26.5500	6.5019E+12	1.2266E+13
11	28.2500	8.4505E+12	1.3866E+13
12	29.9719	1.0718E+13	1.5435E+13
13	31.7156	1.3075E+13	1.7403E+13
14	33.4594	1.5463E+13	1.9730E+13
15	35.2031	1.7901E+13	2.2323E+13
16	36.9469	2.0415E+13	2.5117E+13
17	38.6906	2.3020E+13	2.8073E+13
18	40.4344	2.5727E+13	3.1168E+13
19	42.1781	2.8536E+13	3.4382E+13
20	43.9219	3.1442E+13	3.7697E+13
21	45.6656	3.4430E+13	4.1085E+13
22	47.4094	3.7479E+13	4.4511E+13
23	49.1531	4.0564E+13	4.7925E+13
24	50.8969	4.3662E+13	5.1251E+13
25	52.6406	4.6762E+13	5.4349E+13
26	54.3844	4.9900E+13	5.6904E+13

(continua na próxima página . . .)

27	56.1281	5.3218E+13	5.8031E+13
28	57.6500	5.6590E+13	5.5614E+13
29	58.9500	5.9801E+13	5.2532E+13
30	60.1900	6.3902E+13	4.6181E+13
31	61.3700	6.6191E+13	4.4106E+13
32	62.5500	6.7715E+13	4.3262E+13
33	63.7300	6.8714E+13	4.2977E+13
34	64.9100	6.9285E+13	4.2946E+13
35	66.0900	6.9461E+13	4.3044E+13
36	67.2700	6.9238E+13	4.3272E+13
37	68.4500	6.8572E+13	4.3754E+13
38	69.6300	6.7355E+13	4.4802E+13
39	70.8100	6.5329E+13	4.7100E+13
40	72.0500	6.1438E+13	5.3819E+13
41	73.3500	5.8416E+13	5.7232E+13
42	74.6864	5.5585E+13	5.9721E+13
43	76.0591	5.2974E+13	5.9425E+13
44	77.4318	5.0432E+13	5.7751E+13
45	78.8045	4.7823E+13	5.5409E+13
46	80.1773	4.5079E+13	5.2687E+13
47	81.5500	4.2165E+13	4.9723E+13
48	82.9227	3.9056E+13	4.6606E+13
49	84.2955	3.5735E+13	4.3424E+13
50	85.6682	3.2189E+13	4.0289E+13
51	87.0409	2.8412E+13	3.7338E+13
52	88.4136	2.4434E+13	3.4703E+13
53	89.7250	2.0580E+13	3.2434E+13
54	91.2500	1.6402E+13	2.9321E+13
55	93.0500	1.2547E+13	2.4147E+13
56	94.8500	9.7737E+12	1.7868E+13
57	97.0000	7.8819E+12	1.2174E+13
58	99.5000	6.2294E+12	9.3965E+12
59	102.0000	4.8477E+12	7.3751E+12
60	104.5000	3.6941E+12	5.9583E+12
61	107.0000	2.7219E+12	5.0639E+12
62	109.5000	1.7317E+12	4.2207E+12
63	112.0000	1.0303E+12	2.8455E+12
64	114.5000	5.9376E+11	1.6833E+12
65	117.0000	3.1001E+11	6.7830E+11

TABELA 37 - Fluxos de nêutrons nas miniplacas de U_3Si_2-Al , com $3,1 \text{ gU/cm}^3$ (7^a e 6^a canaletas do estojo). DIM na posição 36. Reator a $5,0 \text{ MW}$.

Malhas	Z (CM)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 ($\text{n/cm}^2.\text{s}$)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 ($\text{n/cm}^2.\text{s}$)
1	1.5000	3.3144E+10	8.8227E+10
2	4.5000	7.0135E+10	2.4108E+11
3	7.5000	1.3344E+11	4.7179E+11
4	10.5000	2.4664E+11	8.6510E+11
5	13.5000	4.5154E+11	1.5488E+12
6	16.5000	8.2245E+11	2.7172E+12
7	19.5000	1.4900E+12	4.6282E+12
8	22.5000	2.6766E+12	7.4880E+12
9	24.8500	4.2495E+12	1.0016E+13
10	26.5500	5.5867E+12	1.1680E+13
11	28.2500	7.1582E+12	1.3413E+13
12	29.9719	8.9413E+12	1.5259E+13
13	31.7156	1.0838E+13	1.7366E+13
14	33.4594	1.2787E+13	1.9721E+13
15	35.2031	1.4788E+13	2.2286E+13
16	36.9469	1.6852E+13	2.5024E+13
17	38.6906	1.8988E+13	2.7909E+13
18	40.4344	2.1201E+13	3.0921E+13
19	42.1781	2.3492E+13	3.4041E+13

(continua na próxima página . . .)

20	43.9219	2.5856E+13	3.7249E+13
21	45.6656	2.8282E+13	4.0520E+13
22	47.4094	3.0756E+13	4.3819E+13
23	49.1531	3.3265E+13	4.7099E+13
24	50.8969	3.5800E+13	5.0286E+13
25	52.6406	3.8375E+13	5.3237E+13
26	54.3844	4.1058E+13	5.5614E+13
27	56.1281	4.4063E+13	5.6458E+13
28	57.6500	4.7399E+13	5.3754E+13
29	58.9500	5.0623E+13	5.0445E+13
30	60.1900	5.4696E+13	4.4446E+13
31	61.3700	5.7002E+13	4.2244E+13
32	62.5500	5.8503E+13	4.1275E+13
33	63.7300	5.9459E+13	4.0908E+13
34	64.9100	5.9986E+13	4.0830E+13
35	66.0900	6.0124E+13	4.0915E+13
36	67.2700	5.9871E+13	4.1162E+13
37	68.4500	5.9173E+13	4.1700E+13
38	69.6300	5.7904E+13	4.2845E+13
39	70.8100	5.5787E+13	4.5241E+13
40	72.0500	5.1851E+13	5.1549E+13
41	73.3500	4.8740E+13	5.5147E+13
42	74.6864	4.5869E+13	5.7817E+13
43	76.0591	4.3416E+13	5.7741E+13
44	77.4318	4.1161E+13	5.6206E+13
45	78.8045	3.8924E+13	5.3970E+13
46	80.1773	3.6619E+13	5.1347E+13
47	81.5500	3.4198E+13	4.8484E+13
48	82.9227	3.1637E+13	4.5464E+13
49	84.2955	2.8920E+13	4.2359E+13
50	85.6682	2.6044E+13	3.9239E+13
51	87.0409	2.3023E+13	3.6179E+13
52	88.4136	1.9910E+13	3.3225E+13
53	89.7250	1.6969E+13	3.0452E+13
54	91.2500	1.3763E+13	2.6922E+13
55	93.0500	1.0732E+13	2.1889E+13
56	94.8500	8.5059E+12	1.6159E+13
57	97.0000	6.9764E+12	1.1090E+13
58	99.5000	5.5810E+12	8.5989E+12
59	102.0000	4.3816E+12	6.7751E+12
60	104.5000	3.3603E+12	5.4901E+12
61	107.0000	2.4870E+12	4.6740E+12
62	109.5000	1.5871E+12	3.8927E+12
63	112.0000	9.4704E+11	2.6258E+12
64	114.5000	5.4702E+11	1.5547E+12
65	117.0000	2.8606E+11	6.2684E+11

TABELA 38 - Fluxos de nêutrons nas miniplacas de U_3O_8-Al , com $3,2 \text{ gU/cm}^3$ (5^a , 4^a e 3^a canaletas do estojo). DIM na posição 36. Reator a 5,0 MW.

Malhas	Z (CM)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$)
1	1.5000	3.0567E+10	8.1745E+10
2	4.5000	6.4519E+10	2.2311E+11
3	7.5000	1.2228E+11	4.3570E+11
4	10.5000	2.2492E+11	7.9700E+11
5	13.5000	4.0922E+11	1.4241E+12
6	16.5000	7.3961E+11	2.4970E+12
7	19.5000	1.3269E+12	4.2625E+12
8	22.5000	2.3545E+12	6.9420E+12
9	24.8500	3.6896E+12	9.3760E+12
10	26.5500	4.8027E+12	1.0956E+13
11	28.2500	6.0834E+12	1.2625E+13
12	29.9719	7.5165E+12	1.4437E+13
13	31.7156	9.0549E+12	1.6452E+13

(continua na próxima página . . .)

14	33.4594	1.0652E+13	1.8653E+13
15	35.2031	1.2299E+13	2.1023E+13
16	36.9469	1.4000E+13	2.3538E+13
17	38.6906	1.5759E+13	2.6179E+13
18	40.4344	1.7578E+13	2.8929E+13
19	42.1781	1.9457E+13	3.1771E+13
20	43.9219	2.1391E+13	3.4685E+13
21	45.6656	2.3374E+13	3.7648E+13
22	47.4094	2.5396E+13	4.0630E+13
23	49.1531	2.7451E+13	4.3588E+13
24	50.8969	2.9540E+13	4.6458E+13
25	52.6406	3.1688E+13	4.9119E+13
26	54.3844	3.3975E+13	5.1282E+13
27	56.1281	3.6619E+13	5.2158E+13
28	57.6500	3.9645E+13	5.0114E+13
29	58.9500	4.2588E+13	4.7338E+13
30	60.1900	4.6307E+13	4.2182E+13
31	61.3700	4.8431E+13	4.0238E+13
32	62.5500	4.9811E+13	3.9367E+13
33	63.7300	5.0681E+13	3.9027E+13
34	64.9100	5.1149E+13	3.8949E+13
35	66.0900	5.1255E+13	3.9020E+13
36	67.2700	5.0996E+13	3.9241E+13
37	68.4500	5.0321E+13	3.9723E+13
38	69.6300	4.9114E+13	4.0740E+13
39	70.8100	4.7124E+13	4.2842E+13
40	72.0500	4.3492E+13	4.8238E+13
41	73.3500	4.0612E+13	5.1233E+13
42	74.6864	3.7971E+13	5.3236E+13
43	76.0591	3.5764E+13	5.3003E+13
44	77.4318	3.3790E+13	5.1560E+13
45	78.8045	3.1875E+13	4.9520E+13
46	80.1773	2.9932E+13	4.7145E+13
47	81.5500	2.7914E+13	4.4559E+13
48	82.9227	2.5797E+13	4.1833E+13
49	84.2955	2.3569E+13	3.9021E+13
50	85.6682	2.1233E+13	3.6172E+13
51	87.0409	1.8809E+13	3.3329E+13
52	88.4136	1.6346E+13	3.0509E+13
53	89.7250	1.4047E+13	2.7794E+13
54	91.2500	1.1541E+13	2.4356E+13
55	93.0500	9.1426E+12	1.9679E+13
56	94.8500	7.3618E+12	1.4526E+13
57	97.0000	6.1366E+12	1.0052E+13
58	99.5000	4.9694E+12	7.8310E+12
59	102.0000	3.9370E+12	6.1947E+12
60	104.5000	3.0397E+12	5.0355E+12
61	107.0000	2.2602E+12	4.2946E+12
62	109.5000	1.4471E+12	3.5734E+12
63	112.0000	8.6617E+11	2.4117E+12
64	114.5000	5.0155E+11	1.4292E+12
65	117.0000	2.6272E+11	5.7664E+11

TABELA 39 - Fluxos de nêutrons nas miniplacas de U_3O_8-Al , com $2,3 \text{ gU/cm}^3$ (2^a e 1^a canaletas do estojo). DIM na posição 36. Reator a 5,0 MW.

Malhas	Z (CM)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 ($\text{n/cm}^2.\text{s}$)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 ($\text{n/cm}^2.\text{s}$)
1	1.5000	2.8032E+10	7.5248E+10
2	4.5000	5.9010E+10	2.0512E+11
3	7.5000	1.1141E+11	3.9972E+11
4	10.5000	2.0390E+11	7.2964E+11
5	13.5000	3.6881E+11	1.3022E+12
6	16.5000	6.6207E+11	2.2857E+12

(continua na próxima página . . .)

7	19.5000	1.1787E+12	3.9220E+12
8	22.5000	2.0741E+12	6.4574E+12
9	24.8500	3.2212E+12	8.7917E+12
10	26.5500	4.1579E+12	1.0205E+13
11	28.2500	5.2173E+12	1.1687E+13
12	29.9719	6.3915E+12	1.3307E+13
13	31.7156	7.6560E+12	1.5096E+13
14	33.4594	8.9761E+12	1.7033E+13
15	35.2031	1.0344E+13	1.9106E+13
16	36.9469	1.1758E+13	2.1300E+13
17	38.6906	1.3219E+13	2.3597E+13
18	40.4344	1.4729E+13	2.5983E+13
19	42.1781	1.6284E+13	2.8443E+13
20	43.9219	1.7883E+13	3.0957E+13
21	45.6656	1.9521E+13	3.3505E+13
22	47.4094	2.1191E+13	3.6061E+13
23	49.1531	2.2891E+13	3.8588E+13
24	50.8969	2.4627E+13	4.1039E+13
25	52.6406	2.6425E+13	4.3323E+13
26	54.3844	2.8355E+13	4.5248E+13
27	56.1281	3.0596E+13	4.6337E+13
28	57.6500	3.3169E+13	4.5589E+13
29	58.9500	3.5619E+13	4.3835E+13
30	60.1900	3.8683E+13	4.0228E+13
31	61.3700	4.0466E+13	3.8840E+13
32	62.5500	4.1646E+13	3.8216E+13
33	63.7300	4.2395E+13	3.7980E+13
34	64.9100	4.2794E+13	3.7934E+13
35	66.0900	4.2873E+13	3.7994E+13
36	67.2700	4.2629E+13	3.8158E+13
37	68.4500	4.2025E+13	3.8512E+13
38	69.6300	4.0969E+13	3.9254E+13
39	70.8100	3.9280E+13	4.0762E+13
40	72.0500	3.6270E+13	4.4532E+13
41	73.3500	3.3851E+13	4.6425E+13
42	74.6864	3.1580E+13	4.7187E+13
43	76.0591	2.9685E+13	4.6586E+13
44	77.4318	2.7991E+13	4.5220E+13
45	78.8045	2.6359E+13	4.3438E+13
46	80.1773	2.4716E+13	4.1406E+13
47	81.5500	2.3025E+13	3.9211E+13
48	82.9227	2.1263E+13	3.6904E+13
49	84.2955	1.9424E+13	3.4526E+13
50	85.6682	1.7512E+13	3.2113E+13
51	87.0409	1.5545E+13	2.9696E+13
52	88.4136	1.3566E+13	2.7279E+13
53	89.7250	1.1727E+13	2.4921E+13
54	91.2500	9.7174E+12	2.1855E+13
55	93.0500	7.7882E+12	1.7611E+13
56	94.8500	6.3538E+12	1.3007E+13
57	97.0000	5.3730E+12	9.0727E+12
58	99.5000	4.4019E+12	7.1006E+12
59	102.0000	3.5188E+12	5.6388E+12
60	104.5000	2.7354E+12	4.5980E+12
61	107.0000	2.0437E+12	3.9285E+12
62	109.5000	1.3130E+12	3.2655E+12
63	112.0000	7.8840E+11	2.2051E+12
64	114.5000	4.5770E+11	1.3080E+12
65	117.0000	2.4017E+11	5.2808E+11

FIGURA 50 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na posição 36, operação a 5,0 MW, 62 horas/semana e 45 semanas/ano, remanejamento das miniplacas para a configuração 2).

FIGURA 51 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na posição 36, operação a 5,0 MW, 120 horas/semana e 45 semanas/ano, remanejamento das miniplacas para a configuração 2).

APÊNDICE D – Estudo de caso: remanejamento do DIM para a posição 65 da PM

Considerações:

- a) Configuração de montagem das miniplacas conforme FIG. 49.
- b) Utilização da posição 65 da placa matriz (central do núcleo)

TABELA 40 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3Si_2-Al , com 4,8 gU/cm³ (10^a, 9^a e 8^a canaletas do estojo). DIM na posição 65. Reator a 5,0 MW.

Malhas	Z (cm)	Densidade de potência (W/cm ³)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 (n/cm ² .s)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 (n/cm ² .s)
1	1.5000	0,0000E+00	7.7482E+10	1.6748E+11
2	4.5000	0,0000E+00	1.6441E+11	4.5111E+11
3	7.5000	0,0000E+00	3.1402E+11	8.8214E+11
4	10.5000	0,0000E+00	5.8276E+11	1.6212E+12
5	13.5000	0,0000E+00	1.0707E+12	2.9057E+12
6	16.5000	0,0000E+00	1.9558E+12	5.0819E+12
7	19.5000	0,0000E+00	3.5503E+12	8.5614E+12
8	22.5000	0,0000E+00	6.3802E+12	1.3502E+13
9	24.8500	0,0000E+00	1.0114E+13	1.7289E+13
10	26.5500	0,0000E+00	1.3355E+13	2.0025E+13
11	28.2500	0,0000E+00	1.7320E+13	2.2868E+13
12	29.9719	0,0000E+00	2.1986E+13	2.5754E+13
13	31.7156	0,0000E+00	2.6909E+13	2.9482E+13
14	33.4594	0,0000E+00	3.1963E+13	3.3968E+13
15	35.2031	0,0000E+00	3.7197E+13	3.9030E+13
16	36.9469	0,0000E+00	4.2681E+13	4.4559E+13
17	38.6906	0,0000E+00	4.8479E+13	5.0523E+13
18	40.4344	0,0000E+00	5.4651E+13	5.6942E+13
19	42.1781	0,0000E+00	6.1249E+13	6.3873E+13
20	43.9219	0,0000E+00	6.8318E+13	7.1408E+13
21	45.6656	0,0000E+00	7.5876E+13	7.9673E+13
22	47.4094	0,0000E+00	8.3886E+13	8.8785E+13
23	49.1531	0,0000E+00	9.2200E+13	9.8582E+13
24	50.8969	0,0000E+00	1.0053E+14	1.0804E+14
25	52.6406	0,0000E+00	1.0871E+14	1.1650E+14
26	54.3844	0,0000E+00	1.1676E+14	1.2316E+14
27	56.1281	0,0000E+00	1.2508E+14	1.2602E+14
28	57.6500	0,0000E+00	1.3353E+14	1.2049E+14
29	58.9500	0,0000E+00	1.4127E+14	1.1331E+14
30	60.1900	1,2985E+02	1,5104E+14	9,9103E+13
31	61.3700	1,2397E+02	1,5639E+14	9,4247E+13
32	62.5500	1,2146E+02	1,5986E+14	9,2141E+13
33	63.7300	1,2054E+02	1,6209E+14	9,1342E+13
34	64.9100	1,2036E+02	1,6333E+14	9,1162E+13
35	66.0900	1,2057E+02	1,6367E+14	9,1320E+13
36	67.2700	1,2115E+02	1,6312E+14	9,1799E+13
37	68.4500	1,2240E+02	1,6158E+14	9,2845E+13
38	69.6300	1,2509E+02	1,5879E+14	9,5070E+13
39	70.8100	1,3081E+02	1,5412E+14	9,9776E+13
40	72.0500	0,0000E+00	1.4514E+14	1.1313E+14
41	73.3500	0,0000E+00	1.3797E+14	1.2072E+14
42	74.6864	0,0000E+00	1.3078E+14	1.2856E+14

(continua na próxima página)

43	76.0591	0,0000E+00	1.2440E+14	1.2925E+14
44	77.4318	0,0000E+00	1.1835E+14	1.2607E+14
45	78.8045	0,0000E+00	1.1222E+14	1.2101E+14
46	80.1773	0,0000E+00	1.0581E+14	1.1491E+14
47	81.5500	0,0000E+00	9.9019E+13	1.0817E+14
48	82.9227	0,0000E+00	9.1787E+13	1.0107E+14
49	84.2955	0,0000E+00	8.4070E+13	9.3839E+13
50	85.6682	0,0000E+00	7.5830E+13	8.6796E+13
51	87.0409	0,0000E+00	6.7040E+13	8.0326E+13
52	88.4136	0,0000E+00	5.7755E+13	7.4786E+13
53	89.7250	0,0000E+00	4.8715E+13	7.0263E+13
54	91.2500	0,0000E+00	3.8820E+13	6.4073E+13
55	93.0500	0,0000E+00	2.9458E+13	5.2904E+13
56	94.8500	0,0000E+00	2.2579E+13	3.8736E+13
57	97.0000	0,0000E+00	1.7776E+13	2.5573E+13
58	99.5000	0,0000E+00	1.3692E+13	1.9310E+13
59	102.0000	0,0000E+00	1.0397E+13	1.4854E+13
60	104.5000	0,0000E+00	7.7521E+12	1.1800E+13
61	107.0000	0,0000E+00	5.6138E+12	9.9295E+12
62	109.5000	0,0000E+00	3.5236E+12	8.3116E+12
63	112.0000	0,0000E+00	2.0677E+12	5.5882E+12
64	114.5000	0,0000E+00	1.1774E+12	3.2903E+12
65	117.0000	0,0000E+00	6.0948E+11	1.3214E+12

TABELA 41 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3Si_2-Al , com $3,1 \text{ gU/cm}^3$ (7ª e 6ª canaletas do estojo). DIM na posição 65. Reator a 5,0 MW.

Malhas	Z (cm)	Densidade de potência (W/cm ³)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 (n/cm ² .s)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 (n/cm ² .s)
1	1.5000	0,0000E+00	7.7729E+10	1.6320E+11
2	4.5000	0,0000E+00	1.6487E+11	4.3882E+11
3	7.5000	0,0000E+00	3.1478E+11	8.5772E+11
4	10.5000	0,0000E+00	5.8377E+11	1.5760E+12
5	13.5000	0,0000E+00	1.0713E+12	2.8241E+12
6	16.5000	0,0000E+00	1.9532E+12	4.9391E+12
7	19.5000	0,0000E+00	3.5343E+12	8.3260E+12
8	22.5000	0,0000E+00	6.3168E+12	1.3174E+13
9	24.8500	0,0000E+00	9.9424E+12	1.7047E+13
10	26.5500	0,0000E+00	1.3061E+13	1.9965E+13
11	28.2500	0,0000E+00	1.6813E+13	2.3184E+13
12	29.9719	0,0000E+00	2.1157E+13	2.6706E+13
13	31.7156	0,0000E+00	2.5826E+13	3.0895E+13
14	33.4594	0,0000E+00	3.0665E+13	3.5723E+13
15	35.2031	0,0000E+00	3.5693E+13	4.1092E+13
16	36.9469	0,0000E+00	4.0962E+13	4.6929E+13
17	38.6906	0,0000E+00	4.6534E+13	5.3218E+13
18	40.4344	0,0000E+00	5.2469E+13	5.9988E+13
19	42.1781	0,0000E+00	5.8826E+13	6.7308E+13
20	43.9219	0,0000E+00	6.5655E+13	7.5291E+13
21	45.6656	0,0000E+00	7.2987E+13	8.4106E+13
22	47.4094	0,0000E+00	8.0805E+13	9.3955E+13
23	49.1531	0,0000E+00	8.8969E+13	1.0476E+14
24	50.8969	0,0000E+00	9.7142E+13	1.1505E+14
25	52.6406	0,0000E+00	1.0517E+14	1.2411E+14
26	54.3844	0,0000E+00	1.1314E+14	1.3102E+14
27	56.1281	0,0000E+00	1.2159E+14	1.3320E+14
28	57.6500	0,0000E+00	1.3052E+14	1.2530E+14
29	58.9500	0,0000E+00	1.3872E+14	1.1671E+14

(continua na próxima página)

30	60.1900	9,1592E+01	1.4871E+14	1.0167E+14
31	61.3700	8,6899E+01	1.5435E+14	9.6092E+13
32	62.5500	8,4802E+01	1.5799E+14	9.3569E+13
33	63.7300	8,3978E+01	1.6028E+14	9.2553E+13
34	64.9100	8,3774E+01	1.6154E+14	9.2283E+13
35	66.0900	8,3920E+01	1.6186E+14	9.2443E+13
36	67.2700	8,4408E+01	1.6125E+14	9.3024E+13
37	68.4500	8,5495E+01	1.5959E+14	9.4325E+13
38	69.6300	8,7818E+01	1.5657E+14	9.7091E+13
39	70.8100	9,2697E+01	1.5152E+14	1.0287E+14
40	72.0500	0,0000E+00	1.4208E+14	1.1824E+14
41	73.3500	0,0000E+00	1.3438E+14	1.2763E+14
42	74.6864	0,0000E+00	1.2690E+14	1.3634E+14
43	76.0591	0,0000E+00	1.2043E+14	1.3744E+14
44	77.4318	0,0000E+00	1.1442E+14	1.3423E+14
45	78.8045	0,0000E+00	1.0840E+14	1.2890E+14
46	80.1773	0,0000E+00	1.0215E+14	1.2241E+14
47	81.5500	0,0000E+00	9.5548E+13	1.1523E+14
48	82.9227	0,0000E+00	8.8528E+13	1.0763E+14
49	84.2955	0,0000E+00	8.1048E+13	9.9857E+13
50	85.6682	0,0000E+00	7.3079E+13	9.2192E+13
51	87.0409	0,0000E+00	6.4629E+13	8.4941E+13
52	88.4136	0,0000E+00	5.5811E+13	7.8320E+13
53	89.7250	0,0000E+00	4.7357E+13	7.2433E+13
54	91.2500	0,0000E+00	3.8039E+13	6.4915E+13
55	93.0500	0,0000E+00	2.9060E+13	5.3085E+13
56	94.8500	0,0000E+00	2.2376E+13	3.8720E+13
57	97.0000	0,0000E+00	1.7677E+13	2.5540E+13
58	99.5000	0,0000E+00	1.3640E+13	1.9283E+13
59	102.0000	0,0000E+00	1.0368E+13	1.4833E+13
60	104.5000	0,0000E+00	7.7351E+12	1.1785E+13
61	107.0000	0,0000E+00	5.6037E+12	9.9173E+12
62	109.5000	0,0000E+00	3.5180E+12	8.3012E+12
63	112.0000	0,0000E+00	2.0649E+12	5.5817E+12
64	114.5000	0,0000E+00	1.1759E+12	3.2867E+12
65	117.0000	0,0000E+00	6.0882E+11	1.3201E+12

TABELA 42 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U₃O₈-Al, com 3,2 gU/cm³ (5^a, 4^a e 3^a canaletas do estojo). DIM na posição 65. Reator a 5,0 MW.

Malhas	Z (cm)	Densidade de potência (W/cm ³)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 (n/cm ² .s)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 (n/cm ² .s)
1	1.5000	0,0000E+00	7.7789E+10	1.6213E+11
2	4.5000	0,0000E+00	1.6500E+11	4.3568E+11
3	7.5000	0,0000E+00	3.1503E+11	8.5154E+11
4	10.5000	0,0000E+00	5.8420E+11	1.5649E+12
5	13.5000	0,0000E+00	1.0719E+12	2.8048E+12
6	16.5000	0,0000E+00	1.9536E+12	4.9065E+12
7	19.5000	0,0000E+00	3.5329E+12	8.2725E+12
8	22.5000	0,0000E+00	6.3091E+12	1.3089E+13
9	24.8500	0,0000E+00	9.9212E+12	1.6931E+13
10	26.5500	0,0000E+00	1.3024E+13	1.9838E+13
11	28.2500	0,0000E+00	1.6754E+13	2.3053E+13
12	29.9719	0,0000E+00	2.1069E+13	2.6575E+13
13	31.7156	0,0000E+00	2.5708E+13	3.0757E+13
14	33.4594	0,0000E+00	3.0517E+13	3.5568E+13
15	35.2031	0,0000E+00	3.5512E+13	4.0912E+13
16	36.9469	0,0000E+00	4.0747E+13	4.6720E+13
17	38.6906	0,0000E+00	4.6282E+13	5.2976E+13
18	40.4344	0,0000E+00	5.2180E+13	5.9713E+13
19	42.1781	0,0000E+00	5.8502E+13	6.7003E+13
20	43.9219	0,0000E+00	6.5300E+13	7.4959E+13

(continua na próxima página)

21	45.6656	0,0000E+00	7.2612E+13	8.3755E+13
22	47.4094	0,0000E+00	8.0420E+13	9.3586E+13
23	49.1531	0,0000E+00	8.8582E+13	1.0436E+14
24	50.8969	0,0000E+00	9.6745E+13	1.1463E+14
25	52.6406	0,0000E+00	1.0475E+14	1.2367E+14
26	54.3844	0,0000E+00	1.1268E+14	1.3057E+14
27	56.1281	0,0000E+00	1.2106E+14	1.3281E+14
28	57.6500	0,0000E+00	1.2985E+14	1.2516E+14
29	58.9500	0,0000E+00	1.3783E+14	1.1706E+14
30	60.1900	9,1054E+01	1.4744E+14	1.0276E+14
31	61.3700	8,6609E+01	1.5291E+14	9.7392E+13
32	62.5500	8,4625E+01	1.5647E+14	9.4966E+13
33	63.7300	8,3847E+01	1.5872E+14	9.3991E+13
34	64.9100	8,3659E+01	1.5995E+14	9.3736E+13
35	66.0900	8,3806E+01	1.6025E+14	9.3900E+13
36	67.2700	8,4287E+01	1.5964E+14	9.4482E+13
37	68.4500	8,5354E+01	1.5798E+14	9.5780E+13
38	69.6300	8,7630E+01	1.5499E+14	9.8532E+13
39	70.8100	9,2399E+01	1.5004E+14	1.0427E+14
40	72.0500	0,0000E+00	1.4090E+14	1.1923E+14
41	73.3500	0,0000E+00	1.3339E+14	1.2820E+14
42	74.6864	0,0000E+00	1.2605E+14	1.3626E+14
43	76.0591	0,0000E+00	1.1968E+14	1.3700E+14
44	77.4318	0,0000E+00	1.1372E+14	1.3365E+14
45	78.8045	0,0000E+00	1.0775E+14	1.2829E+14
46	80.1773	0,0000E+00	1.0153E+14	1.2182E+14
47	81.5500	0,0000E+00	9.4961E+13	1.1465E+14
48	82.9227	0,0000E+00	8.7979E+13	1.0708E+14
49	84.2955	0,0000E+00	8.0540E+13	9.9344E+13
50	85.6682	0,0000E+00	7.2617E+13	9.1713E+13
51	87.0409	0,0000E+00	6.4218E+13	8.4495E+13
52	88.4136	0,0000E+00	5.5456E+13	7.7907E+13
53	89.7250	0,0000E+00	4.7058E+13	7.2054E+13
54	91.2500	0,0000E+00	3.7803E+13	6.4575E+13
55	93.0500	0,0000E+00	2.8886E+13	5.2807E+13
56	94.8500	0,0000E+00	2.2247E+13	3.8520E+13
57	97.0000	0,0000E+00	1.7579E+13	2.5413E+13
58	99.5000	0,0000E+00	1.3568E+13	1.9190E+13
59	102.0000	0,0000E+00	1.0315E+13	1.4763E+13
60	104.5000	0,0000E+00	7.6967E+12	1.1730E+13
61	107.0000	0,0000E+00	5.5765E+12	9.8722E+12
62	109.5000	0,0000E+00	3.5014E+12	8.2634E+12
63	112.0000	0,0000E+00	2.0553E+12	5.5565E+12
64	114.5000	0,0000E+00	1.1706E+12	3.2721E+12
65	117.0000	0,0000E+00	6.0611E+11	1.3142E+12

TABELA 43 - Parâmetros gerados com o CITATION, para as miniplacas de U_3O_8-Al , com 2,3 gU/cm^3 (2ª e 1ª canaletas do estojo). DIM na posição 65. Reator a 5,0 MW.

Malhas	Z (cm)	Densidade de potência (W/cm ³)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 1 (n/cm ² .s)	Fluxo de Nêutrons GRUPO 2 (n/cm ² .s)
1	1.5000	0,0000E+00	7.7660E+10	1.6414E+11
2	4.5000	0,0000E+00	1.6480E+11	4.4132E+11
3	7.5000	0,0000E+00	3.1479E+11	8.6293E+11
4	10.5000	0,0000E+00	5.8412E+11	1.5867E+12
5	13.5000	0,0000E+00	1.0727E+12	2.8456E+12
6	16.5000	0,0000E+00	1.9575E+12	4.9806E+12
7	19.5000	0,0000E+00	3.5476E+12	8.3961E+12
8	22.5000	0,0000E+00	6.3602E+12	1.3243E+13

(continua na próxima página)

9	24.8500	0,0000E+00	1.0055E+13	1.6934E+13
10	26.5500	0,0000E+00	1.3252E+13	1.9641E+13
11	28.2500	0,0000E+00	1.7150E+13	2.2484E+13
12	29.9719	0,0000E+00	2.1727E+13	2.5387E+13
13	31.7156	0,0000E+00	2.6561E+13	2.9103E+13
14	33.4594	0,0000E+00	3.1525E+13	3.3544E+13
15	35.2031	0,0000E+00	3.6664E+13	3.8541E+13
16	36.9469	0,0000E+00	4.2044E+13	4.3990E+13
17	38.6906	0,0000E+00	4.7731E+13	4.9864E+13
18	40.4344	0,0000E+00	5.3789E+13	5.6192E+13
19	42.1781	0,0000E+00	6.0279E+13	6.3037E+13
20	43.9219	0,0000E+00	6.7255E+13	7.0502E+13
21	45.6656	0,0000E+00	7.4746E+13	7.8720E+13
22	47.4094	0,0000E+00	8.2718E+13	8.7806E+13
23	49.1531	0,0000E+00	9.1012E+13	9.7578E+13
24	50.8969	0,0000E+00	9.9303E+13	1.0700E+14
25	52.6406	0,0000E+00	1.0740E+14	1.1543E+14
26	54.3844	0,0000E+00	1.1533E+14	1.2208E+14
27	56.1281	0,0000E+00	1.2345E+14	1.2506E+14
28	57.6500	0,0000E+00	1.3156E+14	1.2012E+14
29	58.9500	0,0000E+00	1.3868E+14	1.1423E+14
30	60.1900	9,122E+01	1.4692E+14	1.0296E+14
31	61.3700	8,774E+01	1.5178E+14	9.8753E+13
32	62.5500	8,622E+01	1.5505E+14	9.6876E+13
33	63.7300	8,566E+01	1.5716E+14	9.6157E+13
34	64.9100	8,556E+01	1.5832E+14	9.6007E+13
35	66.0900	8,571E+01	1.5861E+14	9.6175E+13
36	67.2700	8,611E+01	1.5802E+14	9.6664E+13
37	68.4500	8,698E+01	1.5646E+14	9.7724E+13
38	69.6300	8,882E+01	1.5373E+14	9.9962E+13
39	70.8100	9,2650E+01	1.4935E+14	1.0458E+14
40	72.0500	0,0000E+00	1.4156E+14	1.1652E+14
41	73.3500	0,0000E+00	1.3490E+14	1.2319E+14
42	74.6864	0,0000E+00	1.2818E+14	1.2858E+14
43	76.0591	0,0000E+00	1.2208E+14	1.2817E+14
44	77.4318	0,0000E+00	1.1620E+14	1.2463E+14
45	78.8045	0,0000E+00	1.1018E+14	1.1948E+14
46	80.1773	0,0000E+00	1.0388E+14	1.1339E+14
47	81.5500	0,0000E+00	9.7189E+13	1.0671E+14
48	82.9227	0,0000E+00	9.0071E+13	9.9681E+13
49	84.2955	0,0000E+00	8.2482E+13	9.2534E+13
50	85.6682	0,0000E+00	7.4383E+13	8.5572E+13
51	87.0409	0,0000E+00	6.5753E+13	7.9176E+13
52	88.4136	0,0000E+00	5.6648E+13	7.3694E+13
53	89.7250	0,0000E+00	4.7794E+13	6.9213E+13
54	91.2500	0,0000E+00	3.8106E+13	6.3094E+13
55	93.0500	0,0000E+00	2.8935E+13	5.2086E+13
56	94.8500	0,0000E+00	2.2193E+13	3.8143E+13
57	97.0000	0,0000E+00	1.7485E+13	2.5196E+13
58	99.5000	0,0000E+00	1.3476E+13	1.9033E+13
59	102.0000	0,0000E+00	1.0238E+13	1.4645E+13
60	104.5000	0,0000E+00	7.6373E+12	1.1638E+13
61	107.0000	0,0000E+00	5.5328E+12	9.7946E+12
62	109.5000	0,0000E+00	3.4738E+12	8.1986E+12
63	112.0000	0,0000E+00	2.0392E+12	5.5130E+12
64	114.5000	0,0000E+00	1.1615E+12	3.2466E+12
65	117.0000	0,0000E+00	6.0140E+11	1.3040E+12

FIGURA 52 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na posição 65, operação a 5,0 MW, 62 horas/semana e 45 semanas/ano, disposição das miniplacas na configuração 2).

FIGURA 53 - Duração da irradiação para alcançar as queimas de 50% e 80% do ^{235}U (DIM na posição 36, operação a 5,0 MW, 120 horas/semana e 45 semanas/ano, disposição das miniplacas na configuração 2).

APÊNDICE E – Sumário dos parâmetros neutrônicos e termohidráulicos da irradiação das miniplacas no IEA-R1

TABELA 44 - Parâmetros de irradiação das miniplacas na configuração 1 de montagem do DIM, para as potências de operação do IEA-R1 de 4 , 4,5 e 5,0 MW.

<i>DIM na Pos. 36 – Mini placas no estojo conforme configuração 1</i>	<i>4,0 MW</i>		<i>4,5 MW</i>		<i>5,0 MW</i>	
	Fluxo nêutrons rápidos (máx.) (n/cm ² .s)	Fluxo nêutrons térmicos (máx.) (n/cm ² .s)	Fluxo nêutrons rápidos (máx.) (n/cm ² .s)	Fluxo nêutrons térmicos (máx.) (n/cm ² .s)	Fluxo nêutrons rápidos (máx.) (n/cm ² .s)	Fluxo nêutrons térmicos (máx.) (n/cm ² .s)
1ª, 2ª e 3ª canaletas (mini placas U ₃ Si ₂ -Al com 4,8 gU/cm ³)	3,398 x 10 ¹³	2,944 x 10 ¹³	3,822 x 10 ¹³	3,273 x 10 ¹³	4,247 x 10 ¹³	3,680 x 10 ¹³
4ª e 5ª canaletas (mini placas U ₃ Si ₂ -Al com 3,1 gU/cm ³)	3,979 x 10 ¹³	3,166 x 10 ¹³	4,497 x 10 ¹³	3,562 x 10 ¹³	4,973 x 10 ¹³	3,958 x 10 ¹³
6ª, 7ª e 8ª canaletas (mini placas U ₃ O ₈ -Al com 3,2 gU/cm ³)	4,616 x 10 ¹³	3,440 x 10 ¹³	5,193 x 10 ¹³	3,870 x 10 ¹³	5,770 x 10 ¹³	4,300 x 10 ¹³
9ª e 10ª canaletas (mini placas U ₃ O ₈ -Al com 2,3 gU/cm ³)	5,292 x 10 ¹³	3,743 x 10 ¹³	5,954 x 10 ¹³	4,211 x 10 ¹³	6,615 x 10 ¹³	4,211 x 10 ¹³

Densidade de potência máxima no DIM considerando 10 miniplacas de U₃Si₂-Al de 4,8 gU/cm³ , potência 5,0 MW e posição 36 da placa matriz, (W/cm³): 119

<i>Caso de remanejamento das miniplacas no DIM conforme configuração 2 e potência de operação do reator a 5,0 MW.</i>	Fluxo de nêutrons rápidos (máx.) (n/cm ² .s)	Fluxo de nêutrons térmicos (máx.) (n/cm ² .s)
<i>Posição das miniplacas nas canaletas</i>		
1ª e 2ª canaletas (mini placas com U ₃ O ₈ -Al com 2,3 gU/cm ³)	4,1376 x10 ¹³	3,8788 x10 ¹³
3ª, 4ª e 5ª canaletas (mini placas com U ₃ O ₈ -Al com 3,2 gU/cm ³)	4,9519 x10 ¹³	4,0133 x10 ¹³
6ª e 7ª canaletas (mini placas com U ₃ Si ₂ -Al com 3,1 gU/cm ³)	5,8251 x10 ¹³	4,2157 x10 ¹³
8ª, 9ª e 10ª canaletas (mini placas com U ₃ Si ₂ -Al com 4,8 gU/cm ³)	6,7576 x10 ¹³	4,4144 x10 ¹³

(continua)

(continuação)

<i>Caso de remanejamento do DIM para a posição 65 (central do núcleo) e operação a 5,0 MW</i>	Fluxo de nêutrons rápidos (máx.) (n/cm ² .s)	Fluxo de nêutrons térmicos (máx.) (n/cm ² .s)
1ª e 2ª canaletas (miniplacas com U ₃ O ₈ -Al com 2,3 gU/cm ³)	1,5861 x10 ¹⁴	9,3881 x10 ¹³
3ª, 4ª e 5ª canaletas (miniplacas com U ₃ O ₈ -Al com 3,2 gU/cm ³)	1,6025 x10 ¹⁴	1,0427 x10 ¹⁴
6ª e 7ª canaletas (miniplacas com U ₃ Si ₂ -Al com 3,1 gU/cm ³)	1,6186 x10 ¹⁴	1,0287 x10 ¹³
8ª, 9ª e 10ª canaletas (miniplacas com U ₃ Si ₂ -Al com 4,8 gU/cm ³)	1,6367 x10 ¹⁴	9,9776 x10 ¹³
Densidades de potência máximas nas miniplacas do DIM considerando configuração 2, potência 5,0 MW e posição 65 da placa matriz, (W/cm ³): 83,7 a 130,81		

II ANEXOS

ANEXO A – Dados operacionais termohidráulicos do reator IEA-R1 para operação a 5 MW

A.1 – Vazão e Fluxo de Massa

- Vazão de refrigerante no Circuito Primário = 772,2 m³/h (3400 gpm).
- Vazão em cada EC = 23,0 m³/h (equivalente a um fluxo de massa de 1937,75 Kg/s.m²).
- Velocidade do refrigerante no interior do EC = Q/A

$$\text{Onde } A = 17 \text{ canais} \times 0,289 \times 7,056 = 34,667 \text{ cm}^2$$

$$V = 1,84 \text{ m/s.}$$

A.2 – Potência e fluxo de calor

A potência do reator é admitida constante e igual a 5 MW. Para uma área total de troca térmica de 31,96 m² tem-se um fluxo de calor médio de 15,64 W/cm².

A.3 – Parâmetros termo-hidráulicos do IEA-R1

A TAB. 45 apresenta os limites dos parâmetros termohidráulicos estabelecidos para o IEA-R1.

TABELA 45 – Limites termohidráulicos para o IEA-R1 (IPEN, 1998).

Parâmetros	Condição Limite	Implicação
Temperatura máxima do refrigerante na saída do núcleo	$T_{\text{refr}} < 48^{\circ}\text{C}$	"Set point" de desligamento do Reator
Temperatura máxima do refrigerante no canal quente	$T_{\text{refr}} < 100^{\circ}\text{C (Max)}$	Escoamento bifásico → Condição indesejada
Temperatura máxima do revestimento (placa quente)	$T_{\text{rev}} < 95^{\circ}\text{C (Max)}$	Aumento da taxa de corrosão do revestimento
Início da Ebulição Nucleada (O.N.B.)	$T_{\text{rev}} < T_{\text{ONB}} \text{ (Max)}$	Condição não desejada
Velocidade Crítica	$V_{\text{ec}} < V_{\text{crit}} (*)$	Condição de segurança
Mínima Razão de Instabilidade de Fluxo	$\text{MRIF} \geq 2,0$	Condição de segurança limitante
Mínima Razão de Desvio de Ebulição Nucleada	$\text{MDNBR} \geq 2,0$	Condição de segurança limitante

(*) Miller, (1958).

ANEXO B – Relações de densidade de urânio para combustíveis óxidos e silicetos.

Referência: **IAEA-TECDOC-643 - Research reactor core conversion guidebook.**
Volume 4: Fuels (Appendices I-K)

Este apêndice inclui fórmulas relacionando a densidade de urânio no cerne combustível com a fração em peso do urânio e a fração em volume da fase dispersa.

Relações de Densidade de Urânio

Em geral, a densidade e fração em peso do urânio no cerne combustível composto de alumínio, uma fase dispersa e vazios pode ser escrita como:

$$\rho_U = \frac{(1-P) \cdot W_U}{\frac{1}{\rho_{Al}} - a \cdot W_U} \quad W_U = \frac{(\rho_U / \rho_{Al})}{(1-P) + a \cdot \rho_U} \quad (1)$$

onde

$$a = \frac{1}{W_U^D} \left(\frac{1}{\rho_{Al}} - \frac{1}{\rho_D} \right) \quad (2)$$

P= Porosidade = Volume de Vazios / (Volume de Sólidos + Volume de Vazios)

W_U = Fração em peso de Urânio no cerne combustível

W_U^D = Fração em peso de Urânio na fase dispersa

ρ_{Al} = Densidade do Alumínio = 2,7 g/cm³

ρ_D = Densidade da fase dispersa

Uma formula usual relacionando a terminologia usada pelos fisicos e a terminologia usada pelos fabricantes é a relação entre a densidade de urânio no cerne combustível e a fração em volume (V_f^D) da fase dispersa:

$$\rho_U = W_U^D \rho_D V_f^D \quad (3)$$

A derivação destas formulações é dada abaixo:

D = Fase Dispersa

v = Vazio

Al = Matriz de Alumínio

Balço de Volume para o cerne combustível: $V_c = V_D + V_{Al} + V_v$

Dividido por Mm (massa do cerne): $\frac{V_c}{M_c} = \frac{V_D}{M_c} + \frac{V_{Al}}{M_c} + \frac{V_v}{M_c}$

Substituindo: $\frac{V_c}{M_c} = \frac{1}{\rho_c}$, $\frac{V_D}{M_m} = \frac{V_D}{M_D} \cdot \frac{M_D}{M_c} = \frac{W_D}{\rho_D}$,

$$\frac{V_{Al}}{M_m} = \frac{V_{Al}}{M_{Al}} \cdot \frac{M_{Al}}{M_c} = \frac{W_{Al}}{\rho_{Al}} = \frac{1-W_D}{\rho_{Al}} \quad \text{e} \quad \frac{V_v}{M_c} = \frac{V_v}{V_c} \cdot \frac{V_c}{M_c} = \frac{P}{\rho_c}$$

Para obter:

$$\frac{1-P}{\rho_c} = \frac{W_D}{\rho_D} + \frac{1-W_D}{\rho_{Al}} = \frac{1}{\rho_{Al}} - W_D \left(\frac{1}{\rho_{Al}} - \frac{1}{\rho_D} \right)$$

Substituindo: $\rho_U = \frac{M_U}{M_c} \cdot \frac{M_c}{V_c} = W_U \cdot \rho_c$ e $W_U = W_U^D \cdot W_D$

para obter:

$$\frac{(1-P) \cdot W_U}{\rho_U} = \frac{1}{\rho_{Al}} - W_U \left[\frac{1}{W_U^D} \left(\frac{1}{\rho_{Al}} - \frac{1}{\rho_D} \right) \right] = \frac{1}{\rho_{Al}} - a \cdot W_U$$

Resolvendo para ρ_U :

$$\rho_U = \frac{(1-P) \cdot W_U}{\frac{1}{\rho_{Al}} - a \cdot W_U} \quad \text{que é a expressão (1)}$$

Também:

$$\rho_U = \frac{M_U}{V_c} = \frac{M_U}{M_D} \cdot \frac{M_D}{V_D} \cdot \frac{V_D}{V_c} = W_U^D \cdot \rho_D \cdot V_f^D \quad \text{que é a expressão (3)}$$

ANEXO C – Alguns EC irradiados no IEA-R1 e queimas alcançadas.

TABELA 46 – Parâmetros de utilização de alguns EC irradiados no IEA-R1 ^(A).

EC	Massa U-235 Inicial (g)	Massa U-235 Final (g)	Queima (g)	% de Queima	Data Inicial	Data Final	Dias	Anos	%Q / Ano
129	100,64	81,92	18,72	18,60	18-nov-85	28-set-93	2830	7,9	2,4
130	177,63	114,99	62,64	35,26	5-set-88	9-set-97	3244	9,0	3,9
131	177,10	119,30	57,80	32,64	16-fev-89	9-set-97	3083	8,6	3,8
132	177,13	127,22	49,91	28,18	19-fev-90	9-set-97	2720	7,6	3,7
133	177,11	126,76	50,35	28,43	12-jun-90	9-set-97	2607	7,2	3,9
134	177,19	130,02	47,17	26,62	21-set-90	5-nov-97	2564	7,1	3,7
136	177,16	133,62	43,54	24,58	21-set-90	5-nov-97	2564	7,1	3,5
137	177,20	125,17	52,03	29,36	21-set-90	6-jan-99	2985	8,3	3,5
149	177,66	128,29	49,37	27,79	10-jun-96	06-jan-04	2726	7,6	3,7
150	177,64	118,01	59,63	33,57	10-jun-96	06-jan-04	2726	7,6	4,4
151	177,64	126,69	50,95	28,68	12-nov-96	06-jan-04	2574	7,2	4,0
153	211,19	139,05	72,14	34,16	12-nov-96	06-jan-04	2574	7,2	4,8
155	210,92	144,14	66,78	31,66	9-set-97	1-out-07	3622	10,1	3,1
157	210,44	145,40	65,04	30,91	9-set-97	1-dez-07	3682	10,2	3,0
166	140,56	83,63	56,93	40,50	26-fev-98	31-jul-04	2315	6,4	6,3
169	278,52	157,14	121,38	43,58	14-set-99	31-dez-06	2627	7,3	6,0
171	278,64	162,57	116,07	41,66	14-set-99	31-dez-06	2627	7,3	5,7
172*	278,65	134,78	143,87	47,49	06-jan-04	-	2694	7,5	6,3
173	278,85	164,98	113,87	40,84	06-jan-04	1-fev-10	2185	6,1	6,7
177*	279,10	162,10	117,00	41,92	2-mar-06	-	1918	5,3	7,9
178*	279,18	166,99	112,19	40,19	12-jun-06	-	1818	5,1	8,0
185	198,79	114,06	84,73	42,62	06-jan-04	1-fev-10	2185	6,1	7,0
191	198,59	115,44	83,15	41,87	26-abr-04	1-jan-11	2405	6,7	6,3
193	197,84	112,41	85,43	43,18	3-nov-04	1-jun-11	2368	6,6	6,6
194	198,27	116,73	81,54	41,13	3-nov-04	1-jan-11	2218	6,2	6,7
195	197,76	102,51	95,25	48,16	3-nov-04	1-jun-11	2368	6,6	7,3
196*	197,76	116,69	81,07	40,99	1-ago-05	-	2129	5,9	6,9

OBS.: EC com asterisco continuam sendo irradiados no núcleo (levantamento realizado em 30/07/2011).

^(A) Comunicação pessoal de Júlio B. M. Tondin (CRPq - IEA-R1), e-mail datado de 16/09/2011.

GLOSSÁRIO

<i>Blister</i>	Empolamento (bolha) decorrente do acúmulo de gases de fissão na interface entre o revestimento e o cerne, que pode levar à falha do revestimento da placa combustível. Defeito de formato irregular decorrente de oxidação localizada no revestimento.
Bocal	Componente estrutural que serve para posicionar e sustentar o elemento combustível na placa matriz do núcleo do reator além de direcionar o fluxo de refrigerante.
<i>Breakaway swelling</i>	(Inchamento exagerado de separação): Um tipo de inchamento instável, que pode ocorrer no cerne do combustível devido a coalescência de bolhas de gás de fissão, na medida em que a tensão superficial das bolhas é reduzida o suficiente para permitir a rápida expansão das mesmas, ocasionando perda da integridade do cerne combustível durante um incremento relativamente curto de irradiação.
<i>Burnup</i>	Vide “Queima do combustível”.
Canal de refrigeração	Espaço hidráulico entre placas combustíveis vizinhas, em um elemento combustível do tipo placa, através do qual o fluido refrigerante escoar.
Cerne (ou núcleo combustível)	Material combustível, ou uma combinação de materiais combustíveis com um material não fissionável condutor de calor (matriz), confinada dentro de uma placa combustível. O termo “cerne” ou “núcleo combustível” é recomendado de maneira a evitar confusão com o uso somente do termo “núcleo” que geralmente é usado para referenciar o “núcleo do reator de pesquisas”.
Combustível a dispersão	Cerne que consiste de uma mistura de material fissil disperso numa matriz não fissil metálica
Combustível monolítico	Cerne que consiste de uma peça sólida de material combustível.
Combustível qualificado	Um tipo de combustível licenciado o qual o órgão regulador permite seu uso dentro de limites específicos de densidade de urânio e condições operacionais, em um ou mais reatores de pesquisas e que pode ser fabricado confiável e consistentemente nas especificações requeridas.
Densidade de fissões	Número de fissões que ocorrem por unidade de volume do núcleo do combustível (densidade de fissões no cerne) ou do combustível contendo partículas (densidade de fissões nas partículas de combustível).
Desenvolvimento do combustível	Todas as atividades envolvendo ciência dos materiais e engenharia nuclear, enfocadas no projeto e fabricação de um novo tipo de combustível nuclear e/ou elemento combustível e testes de seu comportamento sob irradiação.
Densidade superficial de urânio	Quantidade de urânio por unidade de área da superfície do revestimento contido no volume do cerne. Notar que o volume do combustível é associado a duas unidades de área do revestimento, uma de cada lado do cerne da placa combustível.
Elemento combustível	Qualquer dispositivo feito a partir de placas combustíveis (ou varetas combustíveis), configurado para ser manuseado como um único componente e capaz de ser irradiado.

Elemento combustível protótipo	Elemento combustível projetado para uso em um reator de pesquisas específico, que contém um combustível não qualificado e no qual se pretende realizar testes de irradiação naquele reator, como parte do processo de qualificação daquele combustível.
Empolamento	Deformação local (em forma de bolha) do revestimento, provocada por acúmulo de gases residuais no cerne ou na interface cerne-revestimento. Ver <i>teste de empolamento</i> .
Inchamento do cerne	Mudança fracional (usualmente expressa em percentual) do volume do cerne não irradiado que ocorre durante a irradiação, devido a uma combinação da densificação do material combustível (resultante da sinterização, que reduz a porosidade original) e do inchamento do material da matriz e partículas combustíveis (resultantes do acúmulo de produtos de fissão nas partículas combustíveis, nucleação e subsequente inchamento dos poros na região de interface dos produtos de interação com o material da matriz ou revestimento do combustível).
Inspeção visual	Exame não destrutivo para avaliar as características gerais de uma miniplaca, placa ou elemento combustível irradiado. É usualmente realizado no interior da piscina de estocagem de combustíveis usados do reator de pesquisas ou reator de potência, utilizando sistema de câmeras subaquáticas de alta resolução de imagem.
LTA (Lead Test Assembly)	Primeiro EC (EC líder), contendo o cerne combustível que foi previamente qualificado com relação ao seu comportamento sob irradiação, a ser irradiado em um reator específico, com o propósito de qualificação do fabricante do combustível e/ou demonstração da adequação do projeto da placa combustível e do EC.
Material combustível	Composto ou liga de urânio usado para formar ou constituir o cerne de uma placa combustível.
Miniplaca combustível	Uma versão em escala reduzida de uma placa combustível.
Partícula combustível	Partícula (dimensão máxima $<300\ \mu\text{m}$) de material combustível produzido por ação mecânica (por exemplo, moagem) ou por processo de atomização do material fundido.
Placa combustível	Dispositivo contendo material fissionável no seu cerne, envolvido por revestimento que separa o cerne do fluido refrigerante do reator e que pode ser irradiado.
PIE (Post Irradiation Examination)	Exames pós-irradiação de combustíveis nucleares, realizados geralmente no interior de células quentes com blindagens especiais para proteção do trabalhador das radiações ionizantes advindas do combustível irradiado.
Placa ou elemento combustível <i>dummy</i>	Placa ou elemento combustível fabricada(o) dentro das especificações requeridas, exceto para aquelas aplicáveis ao cerne, usados para testar o processo de fabricação do EC ou testar alguma propriedade mecânica ou hidráulica do mesmo. Uma placa combustível <i>dummy</i> pode ser fabricada contendo somente o material de revestimento ou usando um material que substitua o material combustível (incluindo urânio natural ou depletado) no cerne, dependendo do uso pretendido para este.

<i>Pillowing</i>	Inchamento expressivo da miniplaca ou placa combustível (em forma de “travesseiro”), com grande aumento da espessura da miniplaca devido a deformação excessiva do revestimento causado pela: i) perda da ligação metalúrgica entre o revestimento e o cerne combustível, sobre uma substancial porção da área do cerne e ii) ação da pressão dos gases de fissão nesta região descolada.
Qualificação do combustível	Um processo conduzido por: (1) um fabricante de combustível para fornecer informações sobre um novo tipo de combustível ou sobre um novo uso para um determinado tipo de combustível já existente para a entidade reguladora para licenciar este tipo de combustível para uso no âmbito de um conjunto delimitado de configurações geométricas e condições de irradiação e (2) um fabricante de combustível para demonstrar ao órgão regulador e cliente que tanto as placas combustíveis como os elementos combustíveis com este tipo de combustível podem ser confiável e consistentemente fabricados a partir das especificações técnicas utilizadas.
Queima do combustível	Percentual de átomos de ^{235}U inicialmente presentes em um dado volume do cerne que é consumido pela fissão por nêutrons.
Revestimento do combustível	Material condutor de calor que envolve o cerne de uma miniplaca ou placa combustível, evitando o escape de produtos de fissão para o ambiente, proporcionando integridade estrutural à mesma.
<i>Sipping</i>	Teste não destrutivo para detectar liberação de produtos de fissão de uma miniplaca, placa ou elemento combustível irradiado. O processo de análise do teste, em geral, está baseado na detecção de raios- γ emitidos pelos radionuclídeos.
Teste de empolamento (na fabricação da placa combustível)	Teste realizado na placa combustível no final do processo de laminação a quente, no qual a placa combustível é aquecida até uma dada temperatura (aproximadamente igual à temperatura de adesão metalúrgica a quente) por um determinado tempo para verificar que os gases residuais no cerne não causarão uma deformação local em forma de bolha (empolamento) do revestimento do combustível. Uma superfície da placa combustível livre de bolhas ou empolamentos indica que o revestimento do combustível está suficientemente aderido ao cerne do combustível.
Teste de empolamento (em placas combustíveis irradiadas)	Teste realizado numa placa combustível irradiada, no interior de célula quente, no qual a placa (ou miniplaca) combustível é sequencialmente aquecida, por incrementos de temperatura, para determinar a temperatura na qual os gases (principalmente os gases de fissão) presentes no cerne se difundem para a interface cerne-revestimento numa quantidade suficiente para deformar localmente o revestimento do combustível, formando uma bolha ou empolamento. A temperatura limiar de empolamento (ou temperatura de empolamento) é a temperatura na qual um ou mais empolamentos aparecem no revestimento da placa combustível.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, D.A. *Avaliação de integridade de revestimentos de combustíveis de reatores de pesquisa e teste de materiais utilizando o ensaio de correntes parasitas*. 2004. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

ALVARES, L.; BOERO, N.; CRISTINI, P.; FERNANDEZ, C.; LOPEZ, M.; QUINTANA, J.; RUGGIRELLO, G.; STANKEVICIUS, A.; TABOADA, H. Status and future plans on research reactors and irradiation technology in Argentina. In: 1st INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MATERIAL TESTING REACTORS, July 16-17, 2008, JAEA-Oarai, Japan. Disponível em: <<http://new-jmtr.jaea.go.jp/contenpage/symp/materials/A-5.pdf>> Acesso em: 05 fev. 2011.

ANSELMET, M-C.; LEMOINE, P.; IRACANE, D.; KOONEN, E.; BENOIT, P.; CAILLIERE, I.; COLOMB, P.; PIN, T.; BRISSON, S. e GUILLOT, S. Qualification program for JHR fuel elements. In: RESEARCH REACTOR FUEL MANAGEMENT - RRFM 2009, 22-25 March, 2009, Vienna, Austria. *Proceedings ...* Vienna, Euronuclear, 2009. 1 CD-ROM.

ANL - ARGONE NATIONAL LABORATORY. Currently-qualified fuels, In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR 2010, 10-14 Oct, 2010, Lisboa, Portugal. Disponível em: <<http://www.rertr.anl.gov/QualFuel.html>>. Acesso em: 02 nov. 2010.

ARPANSA - AUSTRALIAN RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY AGENCY, *RRR SAR-Chapter 5.3*. 2004. Disponível em: <<http://www.arpansa.gov.au/pubs/regulatory/opal/op/SAR/ch5b.pdf>>. Acesso em: 07 mar 2011.

ABENDI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, *Conheça os ensaios não destrutivos - END - ensaio visual*. 2009. Disponível em <http://www.abende.org.br/info_end_oquesao_ensaio.php?w=1024&h=768>. Acesso em: 05 set. 2009.

BARHEN, J.; RHOTENSTEIN, W. and TAVIV, E., *The HAMMER Code System Technion*, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, NP-565, 1978.

BARRY, R.F., *LEOPARD - A spectrum dependent non-spatial depletion code*. WCAP-3269- 26, Westinghouse Electric Corporation, September 1963.

BIBICHEV, B.A.; MAJOROV, V.P.; PROTASENKO, YU. M.; FEDOTOV, P.I.; SUNCHUGASHEV, M.A. The problem of determining fuel burnup from the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activity ratio. *Nuclear Safeguards Technology*, v. I, p. 387-394, 1979. Vienna. (IAEA-SM-231/135).

BÖNING, K.; PETRY, W., Test irradiations of full-sized U_3Si_2 -Al fuel plates up to very high fission densities. *Journal of Nuclear Materials*, v. 383, p. 254-263, 2009.

BREAZEALE, W.W. The swimming pool. A low cost research reactor. *Nucleonics*, v. 10/11, p. 56-60, 1952.

BOYARD, M.; CHEREL, J.M.; PASCAL, C.; GUIGON, B. The Jules Horowitz Reactor core and cooling system design . In: TRTR-IGORR JOINT MEETING, Gaithersburg, MD, USA, September 12-16, 2005. Disponível em:

<<http://www.ncnr.nist.gov/trtr2005/Proceedings/Pascal%20-%20Core%20and%20cooling%20circuits%20text.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2011.

BOULCOURT, P.; SACRISTAN, P.; MARTIN, M.; NAURY, S.; GALLO-LEPAGE, D.; CHAUSSY, J-M.; LOUBIERE, S.; CHABRE, A.; LEMOINE, P. *Instrumented fuel plate for IRIS irradiation program in the OSIRIS reactor*. Disponível em:

<<http://www.ncnr.nist.gov/trtr2005/Proceedings/Boulcourt%20-%20Instru%20Fuel%20Plate%20for%20IRIS%20Irrad.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2010.

CAMERON, R. *Using LEU in OPAL - ANSTO's state of the art multipurpose research reactor*. Disponível em:

<http://www.7ni.mfa.no/NR/rdonlyres/EC9F5DE51CE947AF88C060C5E1865D8A/60590/Cameron_Presentation_Using_LEU_in_OPAL.pdf>. (2006). Acesso em: 07 mar. 2011.

CEA - COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE (FR), *Reacteur Osiris. raport descriptif*. CEA-R-3984 (1970), 154 p.

CEA - COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE (FR), *Les combustibles nucléaires*, Edition Groupe Moniteur, Paris, 2008, 150p., ISBN 978-2-281-11325-9.

Disponível em: http://nucleaire.cea.fr/fr/publications/pdf/Mono2CEA_3FR.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2010.

CEA - COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE (FR), *The Jules Horowitz Reactor - JHR*, página disponível em: <<http://new-jmtr.jaea.go.jp/contenpage/symp/materials/A-1.pdf>>.

Acesso em: 12 set. 2011.

COPELAND, G.L., MARTIN, M.M., *Fabrication of high-uranium-loaded U_3O_8 -Al developmental fuel plates*. ORNL/ TM-7 607. (Dez. 1980). Disponível em

<<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/7014128-J4dsWg/7014128.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2011.

COPELAND, G.L., HOFMAN, G.L., SNELGROVE, J.L., Performance of low-enriched U_3Si_2 -aluminum dispersion fuel elements in the Oak Ridge Research Reactor, In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR, , 1987, Argonne, Illinois. *Proceedings...* Argonne Natl Lab., IL (ANL/RERTR/TM-10). Disponível em:

<<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/5560545-sabDDf/5560545.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2011.

CRAWFORD, D. C.; PORTER, D. L.; HAYES, S. L.; MEYER, M. K.; PETTI, D. A.; PASAMEHMETOGLU, K., An approach to fuel development and qualification. *Journal of Nuclear Materials*, v. 371, p. 232 - 242, 2007. Elsevier. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311507007544>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Norma Técnica: Qualificação de Pessoal e Certificação Para Ensaaios Não Destrutivos em Itens de Instalações Nucleares, Setembro/1999. (CNEN-NN 1.17) Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/mostra-norma.asp?op=117>>. Acesso em: 03 out. 2011.

DILLON, R.L. *Dissolution of aluminum oxide as a regulating factor in aqueous aluminum corrosion*. In: CONFERENCE ON AQUEOUS CORROSION OF NUCLEAR MATERIALS, October 1959, Brussels. *Proceedings...* Brussels. USAEC, 1959, 134p.

DOMAGALA, R.F., WIENCEK, T.C., THRESH, H.R., STAHL, D., The status of uranium-silicide alloy fuel development for the RERTR programme. In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR, Argonne, IL, 1980, Report ANL/RERTR/TM-3, Argonne Natl Lab., IL (1983) 90–115.

DOMINGOS, D.B.; SILVA, A.T.; UMBEHAUN, P.E.; SILVA, J.E.R.; CONTI, T.N.; YAMAGUCHI, M., Neutronic, thermal-hydraulic and accident analysis calculation for an irradiation device to be used in the qualification process of dispersion fuels in the IEA-R1 research reactor. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE - INAC 2009, Rio de Janeiro, RJ. *Proceedings ...* Rio de Janeiro: ABEN, 2009. 1 CD-ROM.

DOMINGOS, D.B. *Cálculos neutrônicos, termo-hidráulicos e de segurança de um dispositivo para irradiação de miniplacas (DIM) de elementos combustíveis tipo dispersão*. 2010. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

DUDERSTADT, J. J. e HAMILTON, L.J., *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1976.

DURAZZO, M.; RAMANATHAN, L.V. Corrosão do Combustível do Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1 do IPEN. In: 2nd INTERNATIONAL CORROSION MEETING-INTERCORR 2008, Recife, PE. *Proceedings...* São Paulo, ABRACO, 2008.

DURAZZO, M.; CARVALHO, E.F.U.; SALIBA-SILVA, A.M.; SOUZA, J.A.B.; RIELLA, H.G., A Tecnologia de fabricação do combustível nuclear a base de dispersão no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP. In: 18º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS -CBECiMat, 24-28 de Novembro de 2008, Porto de Galinhas, PE, Brasil, 2008. Disponível em: <http://pintassilgo2.ipen.br/biblioteca/2008/cbecimat/13268.pdf>. Acesso em 11 jun. 2010.

ELSEAIDY, I.M.; GHONEIM, M.M. Re-qualification of MTR-type fuel plates fabrication process. In: INTERNATIONAL MEETING ON RESEARCH REACTOR FUEL MANAGEMENT - RRFM-2010, 21 -25 March 2010, Marrakech, Marrocos. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/064/41064180.pdf>.

Acesso em: 22 jun 2011.

FINLAY, M.R.; HOFMAN, G.L.; SNELGROVE, J.L. Irradiation behavior of uranium silicide compounds. *Journal of Nuclear Materials*, v. 325, p. 118-128, 2004. Elsevier. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311503005142>>.

Acesso em 03/06/2011.

FLEMING, J.D.; JOHNSON, J.W. Exothermic reactions in Al-U₃O₈ composites, p. 649-66. In: RESEARCH REACTOR FUEL ELEMENT CONFERENCE, September 17-19, 1962, Gatlinburg, Tennessee, TID-7642, Book 2, 1963.

FOWLER, T. B.; VONDY, D. R.; CUNNINGHAM, G. W., Nuclear reactor core analysis code: CITATION, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-2496, Rev. 2, Suppl. 3, July 1972.

GOPALAKRISHNAN, R.K.; RAVI, P.M.; PRASAD, S.K.; IYER, M.R., Failed fuel detection in-reactor coolant using radioiodine measurement. *Nucl. Technol.* v. 111 (1), p. 105-108, 1995.

GRIESS, J.C.; SAVAGE, H.C.; ENGLISH, J.L. Effect of heat flux on the corrosion of aluminum by water. Part IV. Tests relative to the advanced test reactor and correlation with previous results. Oak Ridge, Tn., Oak Ridge National Lab., Report ORNL-5783, 1964.

HAUSNER, H.H.; SCHUMAR, J.F., *Nuclear Fuel Elements*, Reinhold Publ. Corp., New York, 1959.

HOFMAN, G.L.; NEIMARK, L.A., Irradiation behavior of uranium-silicide dispersion fuels. In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR 1983, Tokai, Japão. Report JAERI-M 84-073, Japan Atomic Energy Research Institute. Tokai, p. 43-53, 1984.

HOFMAN, G.L.; RYU, WOO-ESOG. Detailed analysis of uranium silicide dispersion fuel swelling. In: 12 th INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR, Sept. 10-14, (1989), ISBN 3-89336-063-8, pp. 115-135. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/6915172-QJDakQ/6915172.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2011.

HUET, F. et al. The UMUS failure – facts and analysis, Trans. 7th International Topical Meeting on RRFM, Aix-en-Provence, France, 2003, European Nuclear Society (2003) 72-80.

- HUET, F. et al. Post irradiation examinations on UMo full sized plates – IRIS2 experiment. In: 9th INTERNATIONAL MEETING ON RESEARCH REACTOR FUEL MANAGEMENT - RRFM 2005, Budapest, Hungary, April 10-13, 2005. *Proceedings...* Disponível em : <http://www.euronuclear.org/meetings/rrfm2005/presentations/Huet.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2011.
- IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Centro de Engenharia Nuclear (CEN). Relatório de Análise de Segurança – RAS do Reator IEA-R1, 1998.
- IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Centro do Combustível Nuclear (CCN). Documento DQMP-CCN-001-00 Miniplaca Combustível de U_3Si_2 (3,1 e 4,8 gU/cm³) e Miniplaca Combustível de U_3O_8 (2,3 e 3,2 gU/cm³), 2011.
- IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Research reactor core conversion from the use of highly enriched uranium to the use of low enriched uranium fuels guidebook. Vienna, 1980. (IAEA-TECDOC-233).
- IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Standardization of specifications and inspections procedures for LEU plate-type research reactor fuels. TECDOC 467. Vienna, 1988. (IAEA-TECDOC-467). Disponível em http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_467_prn.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidebook on non-destructive examination of water reactor fuel. Vienna, 1991. (IAEA-TRS 322).
- IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Research reactor core conversion guidebook - Volume 4: Fuels- (Appendices I-K). Vienna, 1992. (IAEA-TECDOC-643). Disponível em: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_643_prn.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2009.
- IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Research reactors. Vienna, 1995. Disponível em: http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC48/Documents/gc48inf-4_ftn1.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2011.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Good practices for qualification of high density low enriched uranium research reactor fuels. Nuclear Energy Series No. NF-T-5.2, Vienna, 2009. (IAEA NF-T-5.2, 2009). Disponível em: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1400_web.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2009.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Research Reactor Details - ETRR-2. Vienna, 2010. Disponível em: <http://www.iaea.org/cgi-bin/rrdb.page.pl/rrdeta.htm?country=EG&site=ETRR-2&facno=596>>. Acesso em 03 nov. 2010.
- IPPOLITO JR, T. D. Effects of variation of uranium enrichment on nuclear submarine reactor design. 1990. Dissertação (Mestrado) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA. Disponível em: http://www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/ipp90.pdf>. Acesso em 18 set. 2011.

JRC - JOINT RESEARCH CENTRE. European Commission, High Flux Reactor (HFR). 2005. Disponível em:
<<http://ie.jrc.ec.europa.eu/publications/brochures/HFR%20Mini%20Blue%20book.pdf>>.
Acesso em: 30 jun. 2011

KAWASAKI, M.; NOMURA, S.; ITAMI, H.; KONDO, Y.; KONDO, T.; ITU, N.; AKUTSU, C. Work on corrosion of aluminium in water at the Japan Atomic Energy Research Institute. In: CONFERENCE ON CORROSION OF REACTOR MATERIALS, June 1962, Salzburg. *Proceedings...* Vienna, IAEA, 1962.

KIM, Y.S.; HOFMAN, G.L.; ROBINSON, A.B.; SNELGROVE, J.L.; HANAN, N., Oxidation of aluminum alloy cladding for research and test reactor fuel. Elsevier B.V., *Journal of Nuclear Materials* v. 378, p. 220-228, 2008.

KLEIN, J., CCHEN Activities for minimisation of the use of HEU in Chile. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HEU MINIMIZATION IN THE CIVILIAN SECTOR. 17-20 June 2006, Oslo, Norway. Disponível em:
<http://www.7ni.mfa.no/NR/rdonlyres/EC9F5DE51CE947AF88C060C5E1865D8A/60598/Klein_Presentation_CCHEN_Activities_for_Minimisation.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2011.

KLEIN, S.A.; ALVARADO F.L. *EES Engineering equation solver for the microsoft windows operating system*. Version 4.334W Dec. (1996). Middleton, WI.

LEENAERS, A.; VAN DEN BERGHE, S.; KOONEN, E.; DUBOIS, S.; RIPERT, M.; LEMOINE, P., Post-irradiation examination of AlFeNi clad U₃Si₂ fuel plates irradiated under severe conditions. In: 2007 INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR. *Proceedings...* Lyon, France. March 11-14, 2007. Disponível em:
<http://www.sckcen.be/microstructure/Research/RRFM2007_leenaers.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2011.

LEENAERS, A.; KOONEN, E.; PARTHOENS, Y.; LEMOINE, P.; VAN DEN BERGHE, S., Post-irradiation examination of AlFeNi clad U₃Si₂ fuel plates irradiated under severe conditions. *Journal of Nuclear Materials*. v. 375, p. 243-251, 2008. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311508000172>> Acesso em 22 jun. 2011.

LITTLE, W. W. Jr.; HARDIE, R. W., *2DB user's manual - revision I*, Battelle Pacific Northwest Laboratory, 1969. (BNWL-831, REV. 1).

MARRA, J.E.; PEACOCK, H.B. Reactions during the processing of U₃O₈-Al cermet fuels, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 74 (4), p. 733-738, 2005. Disponível em:
<http://www3.interscience.wiley.com/journal/119339775/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>>
Acesso em: 22 dez. 2009.

MATOS, J.E. LEU Conversion status of U.S. research reactors - ANL/RERTR Program. In: 1996 INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR. *Proceedings...* Seoul, Korea. Oct 7-19, 1996. Disponível

em: <<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/435072-lU3vBV/webviewable/435072.pdf>>.

Acesso em: 27 nov. 2008.

MERCK – Manual Merck Saúde. Disponível em:

<http://mmspf.msdonline.com.br/pacientes/manual_merck/secao_04/cap_038.html#section_5>.

Acesso em: 24 set. 2011.

MILLER, D. R.. Critical velocities for collapse of reactor parallel plate fuel assemblies.

KAPL-1954, (Aug., 1958). Disponível em:

<<http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/4199355-cU7sYa/>>. Acesso em: 04 out.

2011.

NAZARE, S., Low Enrichment Dispersion Fuels for Research and Test Reactors. *Journal of Nuclear Materials*, v. 124, p. 14-24, 1984.

NEWTON, D. G., Low Enrichment Fuel Development at INEL. In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR. Argonne, Illinois, USA, November 9-10, 1978. *Proceedings....* Disponível em:

<http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/043/36043284.pdf>.

Acesso em: 16 abr. 2011.

ORNL - OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, The high flux isotope reactor -

HFIR. Disponível em: <<http://www.ornl.gov/sci/rrd/pages/hfir.html>>. Acesso em: 02 out.

2011.

PASTO, A.E.; COPELAND, G.L. and MARTIN, M.M. *A quantitative differential thermal analysis study of the U₃O₈-Al thermite reaction*. Oak Ridge National Laboratory, June, 1980. (ORNL-5659).

PAWEL, S.J.; FELDE, D.K.; PAWELL, R.E., *Influence of coolant pH on corrosion of 6061-Al under reactor heat transfer conditions*. Oak Ridge National Laboratory, TN, 1995. (Report ORNL/TM-13083). Disponível em:

<<http://www.ornl.gov/~webworks/cpr/rpt/83278.pdf>>. Acesso em 03 out. 2011.

PERROTTA, J.A.; SILVA, J.E.R. Estratégia de utilização de combustíveis MTR de alto teor de urânio para operação do reator IEA-R1 a 5 MW. In: VI CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR - CGEN, 27 de outubro a 01 Novembro, 1996, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro: ABEN, 1996.

PERROTTA, J.A.; TERREMOTO, L.A.A.; ZEITUNI, C.A. Experience on wet storage spent fuel sipping at IEA-R1 Brazilian research reactor. *Ann. Nucl. Energy*. v. 25 (4-5), p. 237-258, 1998.

PERROTTA, J.A. Especificação das miniplacas combustíveis para teste no IEA-R1 (Projeto TC-IAEA). São Paulo, 1999. Doc. interno IPEN/CNEN-SP (PSI.REN.IEAR1.014-ESPT.001.R00).

PERROTTA, J. A. *Curso de capacitação para inspeção visual de combustíveis PWR irradiados*, IPEN/CNEN-SP, São Paulo, 2002.

REST, J. *The DART Dispersion Analysis Research Tool: A mechanistic model for predicting fission-product-induced swelling of aluminum dispersion fuels*. Argonne National Laboratory - ANL, Argonne, Illinois, 1995. (ANL-95/36). Disponível em: <<http://www.rertr.anl.gov/FUELS/REST95.PDF>>. Acesso em 16 abr. 2011.

REUS, U.; WESTMEIER, W., Catalog of gamma rays from radioactive decay – Part II. Data and Nucl. Data Tables. v. 29, p. 193-496, 1983.

RYU, H.J.; KIM, Y. S.; HOFMAN, G. L.; PARK, J. M. and KIM, C. K., Heats of formation of (U, Mo)Al₃ and U(Al,Si)₃. **Journal of Nuclear Materials**, v. 358, p. 52-56, 2006.

ROBINSON, A. B.; LIND, R. P.; WACHS, D. M., Overview of Idaho National Laboratory's Hot Fuels Examination Facility. In: 2007 EUROPEAN WORKING GROUP HOT LABORATORIES AND REMOTE HANDLING, Idaho National Laboratory, 2007. (INL/CON-07-13203). Disponível em: <<http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/3901030.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2011.

RUGGIRELLO, G.; ADELFGANG, P.; DENIS, A. ZAWERUCHA, A.; DI MARCO, A.; GUILLAUME, E.; SBAFFONI, M.; LACOSTE, P. *Program Description for the Qualification of CNEA – Argentina as a Supplier of LEU Silicide Fuel and Post-Irradiation Examinations Plan for the First Prototype Irradiated in Argentina*, Comisión Nacional Energia Atómica - CNEA, 1998. Disponível em: <<http://www.rertr.anl.gov/Fuels98/GRuggirello.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2011.

RUGGIRELLO G.; CALABRONI, H.; SANCHES, M.; HOFMAN, G. Post-irradiation examination of U₃Si_x-Al fuel element manufactured and irradiated in Argentina. In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR. November, 3-8, 2002. Bariloche, Argentina. Disponível em: <<http://www.rertr.anl.gov/Web2002/2003Web/FullPapers-PDF/Ruggirello.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2010.

SACRISTAN, P.; BOULCOURT, P.; NAURY, S.; MARCHAND, L.; CARCREFF, H.; NOIROT, J.; GALLO-LEPAGE, D. MTR Fuel Plate Qualification in Osiris Reactor. In: 26th INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR. November, 7-12, 2004. Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.rertr.anl.gov/RERTR26/pdf/14-Chaussy.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2011.

SCK-CEN BELGIAN NUCLEAR RESEARCH CENTRE, Microstructural and non-destructive analysis. Informações das atividades desenvolvidas no Instituto, 2010. Disponível em: <<http://www.sckcen.be/en/Our-Research/Scientific-Institutes-Expert-Groups/Nuclear-Materials-Science/Microstructural-and-Non-destructive-Analysis>>. Acesso em: 05 jun. 2010.

SILVA, A.T.; SILVA, J.E.R.; TERREMOTO, L.A.A.; DAMY, M.A.; CASTANHEIRA, M.; TEODORO, C.A. *Inspeção Visual de Elementos Combustíveis do Reator IEA-R1 – (30/Junho/2000)*. São Paulo, 2000. Doc. interno IPEN/CNEN-SP (PSE.CENC.IEAR1.014-RELT.001.00).

SILVA, A.T.; SILVA, J.E.R.; TERREMOTO, L.A.A.; CASTANHEIRA, M.; PERROTTA, J.A. *Inspeção Visual de Elementos Combustíveis do Reator IEA-R1 (01 a 08/Agosto/2001)*. São Paulo, 2001. Doc. interno IPEN/CNEN-SP (PSE.CENC.IEAR1.015-RELT.002.02).

SILVA, A.T.; TERREMOTO, L.A.A.; SILVA, J.E.R.; TEODORO, C.A.; DAMY, M.A.; UMBEHAUN, P.E., YAMAGUSHI, M. Qualification program of research reactor fuels manufactured at IPEN-CNEN/SP. *Progress in Nuclear Energy*, v. 50, p. 795-799, 2008.

SILVA, J.E.R.; TEIXEIRA e SILVA, A.; TERREMOTO, L.A. Inspection experience with IEA-R1 spent fuel and non-destructive methods for qualification of high density LEU fuel (U_3Si_2 -Al) at IPEN-CNEN/SP. In: RESEARCH REACTOR FUEL MANAGEMENT-RRFM 2009, March 22-25, 2009, Vienna, Austria. *Proceedings...* Brussels, Belgium: ENS, 2009. 1 CD-ROM.

SILVA, J.E.R.; DOMINGOS, D.B. *Comissionamento do Medidor de Espessuras de Miniplacas Irradiadas*. São Paulo, 2009. Doc. interno IPEN/CNEN-SP. (PSE.CENC.IEAR1.100.00-RELT.001.00).

SILVA, J.E.R.; TEIXEIRA e SILVA, A.; TERREMOTO, L.A.A.; DURAZZO, M. Program for in-pile qualification of high density silicide dispersion fuel at IPEN/CNEN-SP. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, INAC - 2009, Sept 27-Oct 02, 2009, Rio de Janeiro, RJ. *Proceedings....* Rio de Janeiro: ABEN, 2009. 1 CD-ROM.

SILVA, J.E.R. *Procedimento Operacional para Utilização do Dispositivo Medidor de Espessuras de Miniplacas Combustíveis Irradiadas no Reator IEA-R1*. São Paulo, 2010. Doc. interno IPEN/CNEN-SP. (PO.CENC.0907.001-00).

SIMÕES, A.V. *Desempenho sob irradiação de combustíveis a dispersão de MTR*. 1993. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

SINDELAR, R.; NOVARA, O.; LAFUENTE, J.; SILVA, J.E.R.; ALENCAR, D.A.; DALIDET, J.K.; LOYA, A.D. e SALAZAR, A.G. Criteria for Categorization of Fuel Damage. In: 2nd WORKSHOP ON SPENT NUCLEAR FUEL CHARACTERIZATION, Promoted by IAEA. Dec 03-06, 2002, Buenos Aires, Argentina. 1 CD-ROM.

SMITH, M.L.; BIGNELL, L.J.; ALEXIEV, D; MO, L. Sipping test: checking for failure of fuel elements at the Opal reactor. *Nuclear Engineering and Technology*, v.42 (1), 2010. Disponível em: <<http://article.nuclear.or.kr/jknsfile/v42/JK0420125.pdf>> Acesso em: 7 mar. 2011.

SNELGROVE, J.L.; DOMAGALA, R.F. ; HOFMAN, G.L. ; WIENCEK, T.C.; COPELAND, G.L.; HOBBS, R.W.; SENN, R.L. The use of U_3Si_2 dispersed in aluminum in plate-type fuel elements for research and test reactors. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, 1987.

(ANL/RERTR/TM-11). Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/5688807-BSF3kR/5688807.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2010.

SNELGROVE, J.L.; HOFMAN, G.L.; MEYER, M.K.; TRYBUS, C.L. e WIENCEK, T.C. Development of very-high-density low-enriched-uranium fuels. *Nucl. Eng. Des.*, v. 178, p. 119-126, 1997.

SOLIS, D.; TABOADA, H.; REST, J. CNEA/ANL Collaboration Program to Develop an Optimized Version of DART Validation and Assessment by Means of U₃O₈-Al Dispersed CNEA Miniplate Irradiation Behavior. In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR, October, 18-23, 1998. São Paulo, Brazil. Disponível em: <<http://www.rertr.anl.gov/Fuels98/HTaboada.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

SURIPTO, A.; SUGONDO, S.; NASUTION, H.; HOFMAN, G.L. Postirradiation examination of a low enriched U₃Si₂-Al fuel element manufactured and irradiated at Batan, Indonesia. INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR, September, 18-23, 1994. Williamsburg, Virginia, USA. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp;jsessionid=7FEF85336AB09FAA10E81A10CCA21651?purl=/10107485-21bH8I/webviewable/>>. Acesso em: 17 jun 2010.

TESA® Length Measuring Equipments with Inductive Probes – Catalogue of electronic length measuring equipment. Disponível em: <http://tesatool.com/pdf_files/catalog_probe.pdf>. Acesso em: 22 out. 2011.

TERREMOTO, L.A.A.; ZEITUNI, C.A.; PERROTTA, J.A.; SILVA, J.E.R. Gamma-ray spectroscopy on irradiated MTR fuel elements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. v. 450, p. 495-514, 2000.

TERREMOTO, L.A.A. *Disciplina TNR 5764 – Fundamentos de Tecnologia Nuclear – Reatores*. Divisão de Ensino – Secretaria de Pós-Graduação- IPEN/CNEN-SP. São Paulo, 2004. Disponível em: <http://www.ipen.br/conteudo/upload/200807151602270.4_TNR5764_Apostila.pdf>. Acesso em: 16 junho 2011.

TISSIER, A. Working towards better LEU fuel production. *Nuclear Engineering International*. v. 36, p. 449, 1991.

TORRES, G.; MARIN, J.; LISBOA, J.; BARRERA, M.; OLIVARES, L. Development of nuclear fuel for research reactors in Chile. In: SIMPÓSIO DA AMERICAN NUCLEAR SOCIETY - LATIN AMERICAN SECTION (ANS-LAS), 21 - 25 Junho, 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: <<http://www.las-ans.org.br/Papers%202010/30%20Gonzalo%20Torres.pdf>>. Acesso em: 19 maio 2011.

TORRES, W.M.; UMBEHAUN, P.E.; ANDRADE, D.A. *Experimento para o dimensionamento da placa de limitação de vazão (PLV) do dispositivo de irradiação de*

miniplacas (DIM) do IEA-R1. São Paulo, 2002. Doc. interno IPEN/CNEN-SP. (P&D.CENT.CENT.035.00-RELT.01.R00).

TOSCANO, E.H. *Curso sobre Post Irradiation Examination - PIE*. Joint Research Centre- European Commission. Novembro de 2005, Fundação Pátria, Iperó- SP. 1 CD-ROM.

TRAVELLI, A. The RERTR program: progress and plans. In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR. Sep. 28 - Oct. 1, 1987, Buenos Aires, Argentina. *Proceedings...* Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/5688788-rfs11J/5688788.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2010.

TRAVELLI, A., The U.S. RERTR program status and progress. In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR, Jackson Hole, Wyoming, USA, Oct. 5-11, 1997. Disponível em: <<http://www.rertr.anl.gov/Misc97/TRAVEL97.html>>. Acesso em: 16 abr. 2011.

TROUTNER, V.H. *Uniform aqueous corrosion of aluminum. Effects of various ions*. Richland, Washington. Hanford Atomic Products Operations, Report HW-50133, 1957.

UMBEHAUM, P.E. *Metodologia para análise termohidráulica de reatores de pesquisa tipo piscina com combustível tipo placa*. 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

USNRC -UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: *Safety Evaluation report related to the evaluation of low-enriched uranium silicide-aluminum dispersion fuel for use in non-power reactors*. July 1988. (USNRC Report NUREG-1313).

VAN DEN BERGUE, S., *SCK.CEN-Microstructural and non-destructive analysis*. Belgian Nuclear Research Centre. 2011. Disponível em: <<http://www.sckcen.be/en/Our-Research/Scientific-Institutes-Expert-Groups/Nuclear-Materials-Science/Microstructural-and-Non-destructive-Analysis>>. Acesso em: 29 mar. 2011.

YAMAGUCHI, M. *Validação da metodologia de cálculo neutrônico do reator IEA-R1*. São Paulo, 1997. Doc. interno do IPEN/CNEN-SP.

YEHIA, H.A.; BARS, G.; DAI, P.T. Safety aspects and licencing requirements for new fuel qualification tests and use in research reactors. In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS - RERTR, November 3-8, 2002, Bariloche, Argentina. *Proceedings...* Disponível em: <<http://www.rertr.anl.gov/Web2002/2003Web/Yehia.html>>. Acesso em: 11 jun. 2010.

WANG, L. L.; MUNIR, Z. A.; MAXIMOV, Y. M. Review thermite reactions: their utilization in the synthesis and processing of materials. *Journal of Materials Science*, v. 28, p. 3693-3708, 1993.

WAUGH, R. C. *The reaction and growth of uranium dioxide-aluminum fuel plates and compacts*. 1959. (ORNL-2701). Disponível em: <<http://www.ornl.gov/info/reports/1959/3445603613132.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2011.

WACHS, D.M. *RERTR Fuel Development and Qualification Plan*. (INL/EXT-05-01017 Rev. 3), 2007. Disponível em: <<http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/3610331.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2010.

ZEITUNI, C.A.; TERREMOTO, L.A.A.; SILVA, J.E.R.. Sipping tests on a failed irradiated MTR fuel element. In: PHYSOR 2004 - THE PHYSICS OF FUEL CYCLES AND ADVANCED NUCLEAR SYSTEMS: GLOBAL DEVELOPMENTS. April 25-29, 2004, Chicago, Illinois. *Proceedings...* American Nuclear Society, Lagrange Park, IL., 2004. 1 CD-ROM