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

**Avaliação da influência do ajuste entre moldura e briquete na deformação do
núcleo de placas combustíveis**

REGINALDO SALDES COSTA

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

**Orientador:
Prof. Dr. Michelangelo Durazzo**

**São Paulo
2020**

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

**Avaliação da influência do ajuste entre moldura e briquete na deformação do
núcleo de placas combustíveis**

Versão Corrigida

#

REGINALDO SALDES COSTA

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

#

#

#

**# Orientador: Prof. Dr. Michelangelo
Durazzo**

**São Paulo
2020**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

SALDES, R. C. ***Avaliação da influência do ajuste entre moldura e briquete na deformação do núcleo de placas combustíveis***. 2020. 120 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Saldes, Reginaldo Costa Avaliação da influência do ajuste
entre moldura e briquete na deformação do núcleo de placas
combustíveis / Reginaldo Costa Saldes; orientador
Michelangelo Durazzo. -- São Paulo, 2020.
120 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

1. combustível para reator de pesquisa. 2. trincas no
núcleo da placa combustível. 3. combustível tipo MTR. 4.
dimensões para combustíveis tipo placa. 5. folga entre
briquete e moldura nos combustíveis tipo placa . I.
Durazzo, Michelangelo, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Reginaldo Saldes Costa

Título: Avaliação da influência do ajuste entre moldura e briquete na deformação do núcleo de placas combustíveis

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: ____/____/____

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof. Dr.: _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que com todo Seu amor me deu forças para superar os obstáculos. A minha esposa Sandra e minhas filhas Ana Paula e Aline por todo apoio e paciência. Também dedico aos meus pais Neide Saldes Costa e José Costa que são exemplos de humildade e bondade.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Michelangelo Durazzo, pelo direcionamento e condução, pelos conhecimentos compartilhados e tempo de dedicação no meu aprendizado.

A todos que me incentivaram e me apoiaram nas horas difíceis, principalmente aos meus pais, minhas irmãs: Rosemeire Saldes Costa e Rosana Saldes Costa e meus amigos: Abilio Weber, Adelmo Moncayo, Alexandre Ribeiro, Alexandre Saito, Carlos Alberto Coelho, Cristiano Nascimento Alves, Édson Pereira dos Santos, Helen de Almeida, Ina Paola Rao, Marcos Fonseca, Nanci Gardim, Nayana Frizon, Renata Ponçano, Ricardo de Oliveira e Sumara Regina Ancona.

Aos colaboradores do Centro de Combustível Nucleares do IPEN, principalmente os colegas Felipe Ferrufino, Ilson Carlos Martins, Lauro Roberto dos Santos, pelas contribuições, produção dos briquetes, laminação e radiografia das placas. E ao professor Maciel do SENAI da Vila Alpina na produção das molduras.

A todos que direta ou indiretamente me apoiaram, incentivaram e participaram ativamente neste projeto.

Ao SENAI São Paulo nas pessoas dos senhores Ricardo Terra e Osvaldo Lahoz Maia que firmaram o convênio com o IPEN proporcionando acesso ao programa de Pós-Graduação.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, que proporcionou grande parte dos recursos como as instalações, as máquinas e equipamentos e os insumos para a realização deste trabalho.

RESUMO

SALDES, R. **Avaliação da influência do ajuste entre moldura e briquete na deformação do núcleo de placas combustíveis**. 2020. 120p. Dissertação (Mestre em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN - CNEN/SP. São Paulo.

O Reator Multipropósito Brasileiro, conhecido como RMB, visa a produção de radioisótopos para aplicação na saúde, indústria e meio ambiente, irradiação e teste de materiais, realização de pesquisas científicas em física nuclear e aplicação de feixe de nêutrons em apoio a pesquisas científicas e tecnológicas desenvolvidas em várias áreas do conhecimento. O combustível para esse reator é do tipo MTR (Materials Testing Reactor) e será produzido pelo Centro de Combustível Nuclear do IPEN, que já vem desenvolvendo e fabricado rotineiramente esse tipo de combustível e tem como desafio aumentar a produtividade das instalações para atender à atual e futura demanda. Objetivou-se neste trabalho estudar a influência da folga entre o briquete e a cavidade da moldura no aparecimento de trincas no núcleo da placa combustível. Para isso, realizou-se uma análise do processo de produção das placas a serem usadas no Reator Multipropósito Brasileiro e estudou-se diferentes folgas definiu-se uma folga padronizada. Foram laminadas e radiografadas placas combustíveis montadas com diferentes folgas entre a moldura e o briquete, identificando-se a ocorrência de trincas no núcleo. As informações obtidas permitiram definir as dimensões e tolerâncias adequadas dos briquetes e das cavidades das molduras que garantem a produção de placas combustíveis dentro dos padrões aceitáveis, melhorando a produtividade do Centro de Combustível Nuclear. Além da folga entre o briquete e a cavidade da moldura, a qual era considerada a principal causa para o trincamento do núcleo, outras causas também foram investigadas. Tanto a folga como também a qualidade do acabamento superficial da matriz de compactação do briquete mostraram-se ser a causa para o trincamento do núcleo durante a laminação das placas combustíveis.

Palavras chaves: reator de pesquisa; combustível tipo placa; dimensões para combustível tipo placa; folga entre briquete e moldura; trincas no núcleo da placa combustível

ABSTRACT

SALDES, R. Evaluation of the influence of the adjustment between frame and briquette on the deformation of the fuel plate core. 2020. 120p. Dissertação (Mestre em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN - CNEN/SP. São Paulo.

The Brazilian Multi-Purpose Reactor, known as RMB, aims to produce radioisotopes for use in health, industry and the environment, irradiation and material testing, conducting scientific research in nuclear physics and applying a neutron beam in support of scientific and technological research developed in various areas of knowledge. The fuel for this reactor is of the MTR (Materials Testing Reactor) type and will be produced by the Nuclear Fuel Center of IPEN, which has already developed and routinely manufactured this type of fuel and has the challenge of increasing the productivity of the installations to meet the current and future demand. The objective of this work was to study the influence of the gap between the briquette and the frame cavity on the appearance of cracks in the fuel plate core. For this, an analysis of the production process of the fuel plates to be used in the Brazilian Multi-Purpose Reactor was carried out and different clearances were studied, a standardized clearance was defined. Fuel plates assembled with different gaps between the frame and the briquette were laminated and radiographed, identifying the occurrence of cracks in the core. The information obtained allowed to define the appropriate dimensions and tolerances of the briquettes and cavities of the frames that guarantee the production of fuel plates within acceptable standards, improving the productivity of the Nuclear Fuel Center. In addition to the gap between the briquette and the frame cavity, which was considered the main cause for cracking the core, other causes were also investigated. Both the clearance and the quality of the surface finish of the briquette compaction matrix proved to be the cause for the cracking of the core during the rolling of the fuel plates.

Key words: research reactor; plate type fuel; dimensions for plate type fuel; clearance between briquette and frame; cracks in the fuel plate core.

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1 – Lista de radiofármacos com os radioisótopos associados e aplicações na medicina nuclear	17
Tabela 2 - Resumo dos tipos de radioisótopos a serem produzidos no RMB	25
Tabela 3 - Critérios da homogeneidade do material combustível.....	55
Tabela 4 - Dimensões planejadas para a abertura das cavidades nas molduras	61
Tabela 5 - Programa de laminação adotado na fabricação das placas combustíveis.....	70
Tabela 6 - Programa de laminação adotado na fabricação das placas combustíveis.....	71
Tabela 7 – Programa de laminação adotado na fabricação das placas combustíveis.....	74
Tabela 8 – Programa de laminação adotado na fabricação das placas combustíveis.....	75
Tabela 9 - Ajustes entre cavidade da moldura e briquete na dimensão do comprimento.....	78
Tabela 10 - Ajustes entre moldura e briquete na dimensão da largura das placas estudadas ..	78
Tabela 11 - Apresentação dos dados das placas de combustível que apresentaram trincas – número da placa, tipo de ajuste e a incidência de trincas	80
Tabela 12 - Características dimensionais dos briquetes utilizados na elaboração dos lotes com folga variada e folga padronizada	87
Tabela 13 - Dimensões e tolerâncias especificadas para os briquetes.....	88
Tabela 14 - Dimensões da cavidade das molduras conforme as folgas planejadas e dimensões reais obtidas	89
Tabela 15 - Esquema de seleção de molduras e briquetes para obtenção das folgas reais, no sentido da largura, mais próximas das planejadas	90
Tabela 16 - Folgas reais produzidas e incidência de trincas nas placas.....	91
Tabela 17 - Dimensões nominais e tolerâncias para as molduras para obtenção da folga padronizada.....	99
Tabela 18 - Folgas máxima reais entre as molduras e briquetes das placas elaboradas com folga padronizada	100

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Características gerais do projeto do reator RMB	19
Figura 2 - Perspectiva da piscina do reator RMB e descrição de seus componentes internos .	21
Figura 3 - Planta esquemática do complexo do RMB.....	23
Figura 4 - Densidade de urânio na dispersão em função da concentração da fase físsil dispersa para os principais compostos de urânio.	30
Figura 5: Diagrama de blocos simplificado do processo de fabricação do elemento combustível.32	
Figura 6 - Ilustração do processo de fabricação do pó de UF ₄ a partir do UF ₆	34
Figura 7 - Representação do processo de fabricação de urânio metálico	35
Figura 8 - Ilustração do processo de fabricação de siliceto de urânio.....	36
Figura 9 - Foto apresentando a limpeza da matriz de compactação do briquete.....	39
Figura 10 - Ilustração do processo de preparação dos briquetes e desgaseificação.....	39
Figura 11 - Foto do laminador utilizado no processo de rebaixamento da espessura das tiras de alumínio	40
Figura 12 - Fotos da tira da chapa de alumínio empenada após o processo de laminação	41
Figura 13 - Foto da tira de alumínio e do macete de borracha sobre a mesa de desempenho ...	41
Figura 14 - Foto da tira de chapa cortada e desempenada	42
Figura 15 – Foto do dispositivo de fixação das placas sobre a mesa do centro de usinagem ..	42
Figura 16 – Foto da ferramenta de corte afixada no mandril e do fluido de corte utilizado no processo de usinagem para a abertura de cavidade na moldura.....	43
Figura 17 - Esquema ilustrativo da montagem do conjunto núcleo-moldura-revestimentos	44
Figura 18 – Fotos do conjunto moldura, revestimentos e briquete fixos na bancada de fixação preparados para o processo soldagem.....	45
Figura 19 – Fotos do técnico realizando a soldagem do conjunto moldura, revestimentos e briquete na bancada.....	45
Figura 20 – Foto do rack de armazenagem dos conjuntos soldados	46
Figura 21 – Foto das placas soldadas no forno de aquecimento	46
Figura 22 – Esquema ilustrativo do princípio da laminação	47
Figura 23 – Foto do laminador de rolos	48
Figura 24 – Ilustração da placa combustível laminada e apresentação do núcleo, da moldura e dos revestimentos	49
Figura 25 - Sequência simplificada de montagem e laminação de placas combustíveis	49
Figura 26 – Ilustração dos defeitos terminais característicos na fabricação de placas combustíveis denominados de “Dog-boning” e “fish tai”	52
Figura 27 - Ilustração do defeito “flecha”	52

Figura 28 - Ilustração do esquema de rotação adotado na operação de laminação da placa de combustível	53
Figura 29 - Ilustração de trincas na placa combustível por meio de positivo de radiografia	54
Figura 30 - Ilustração das etapas do processo de montagem do elemento combustível.....	55
Figura 31 - Foto da montagem das placas combustíveis nas canaletas dos suportes laterais .	56
Figura 32 - Fotos do equipamento e ferramenta utilizada na operação de cravamento das placas combustíveis nas canaletas dos suportes laterais para a formação do estojo	56
Figura 33- Foto da parte interna do estojo com destaque para as canaletas/ranhuras	57
Figura 34 - Esquema ilustrativo do elemento combustível fabricado no IPEN	58
Figura 35 - Endireitamento e verificação do aplainamento da placa da moldura	62
Figura 36 - Foto de moldura presa no sistema de fixação do centro de usinagem para a uniformização do comprimento e largura	63
Figura 37 - Foto da moldura afixada no sistema de fixação do centro de usinagem	64
Figura 38 - Foto da placa afixada no suporte do centro de usinagem e os pontos de referência sinalizados.....	64
Figura 39 – Foto do comando a CNC do centro de usinagem	65
Figura 40 - Foto da fresa de topo de duas arestas de corte	65
Figura 41 - Foto do paquímetro quadrimensional de 150 mm	66
Figura 42 - Foto do anel padrão de 25,00 mm.....	67
Figura 43 - Fotos do conjunto montado composto pela moldura, briquete e as revestimentos .	69
Figura 44 - Fotos das placas soldadas acomodadas em suporte especial	69
Figura 45 - Esquema ilustrativo do conjunto montado, soldado e pronto para o processo de laminação	69
Figura 46 - Foto do laminador, da placa entre os cilindros e do operador fazendo a condução da placa no processo de laminação.....	72
Figura 47 - Ilustração adaptada das classes de ajuste para acoplamento de eixos e furos (sistema furo-base)	76
Figura 48 - Identificação do lado da placa combustível para localização das trincas	79
Figura 49 - Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca	81
Figura 50 - Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca em partes específicas.....	82
Figura 51 - Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca em partes específicas.....	83
Figura 52 - Radiografia da placa de número 301 apresentando o defeito de trinca em partes específicas.....	84
Figura 53 - Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca em partes específicas.....	85
Figura 54 - Desenho do briquete com as dimensões nominais e respectivos afastamentos especificados.....	88
Figura 55 - Imagens das radiografias das placas com folga de 1,00 mm	92
Figura 56– Imagens de metalografia de secção de placas combustíveis com diminuição acentuada de espessura por falta de material físsil.....	93
Figura 57 - Imagens das radiografias das placas com folga de 0,80 mm	94

Figura 58 - Imagens das radiografias das placas com folga de 0,60 mm	95
Figura 59 - Imagens das radiografias das placas com folga de 0,40 mm	96
Figura 60 - Imagens das radiografias das placas com folga de 0,20 mm	97
Figura 61 - Imagens das radiografias das placas com folga de 0,10 mm	98
Figura 62 - Desenho da cavidade da moldura com as dimensões nominais e respectivas tolerâncias	99
Figura 63 - Imagens das radiografias das placas 08, 10, 11, 14 e 15 com folga padronizada	102
Figura 64 – Imagens das radiografias das placas 16, 17, 20, 21 e 24 com folga padronizada	103
Figura 65 – Imagens das radiografias das placas 34, 39, 48, 50 e 52 com folga padronizada	104
Figura 66 – Imagens das radiografias das placas 55, 56, 57, 58 e 59 com folga padronizada	105
Figura 67 – Imagem de radiografia de duas placas com trincas características causadas por excesso de folga e outras trincas observadas	106
Figura 68 – Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca	107
Figura 69 – Foto do briquete 52 e detalhe de um dos cantos com pequenas lascas	108
Figura 70 – Foto do briquete 50 e detalhe de cantos com pequenas lascas e lateral faltando material	108
Figura 71 – Foto do briquete 58 e detalhe de cantos com pequenas lascas e lateral faltando material	109
Figura 72 – Foto do briquete 42 com detalhe da região lateral e cantos	110
Figura 73 – Imagem da região lateral do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV	110
Figura 74 – Imagem da região lateral do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV	111
Figura 75 – Imagem da região lateral do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV	111
Figura 76 – Imagem do canto do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV	112
Figura 77 – Imagem do canto do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV	112
Figura 78 – Imagem do canto do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV.	113

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	16
2	<u>MOTIVAÇÃO DO TRABALHO</u>	27
3	<u>OBJETIVO</u>	28
3.1	<u>Objetivos Específicos</u>	28
4	<u>REVISÃO DA LITERATURA</u>	29
4.1	<u>Processo de fabricação de elementos combustíveis</u>	32
4.1.1	<u>Pó de UF₄</u>	33
4.1.2	<u>Urânio metálico</u>	34
4.1.3	<u>Briquetes</u>	37
4.1.4	<u>Fabricação das placas combustíveis</u>	40
4.2	<u>Processo de qualificação das placas combustíveis</u>	50
4.2.1	<u>Qualidade do caldeamento</u>	50
4.2.2	<u>Inspeção dimensional</u>	50
4.2.3	<u>Radiografias</u>	50
4.2.4	<u>Defeitos terminais – “Dog-boning” e “Fish tail”</u>	51
4.2.5	<u>Defeitos terminais – Flecha</u>	52
4.3	<u>Trincas</u>	53
4.4	<u>Montagem do elemento combustível</u>	54
5	<u>METODOLOGIA</u>	59
5.1	<u>Análise do processo de fabricação do lote piloto de placas combustíveis</u>	60
5.2	<u>Descrição do dimensionamento das folgas variadas</u>	60
5.3	<u>Descrição do processo de produção das dezoito molduras com folgas variadas</u>	61
5.4	<u>Descrição do dimensionamento da folga padronizada</u>	67
5.5	<u>Descrição do processo de produção das vinte molduras com folga padronizada</u>	68
5.6	<u>Descrição do processo de montagem e laminação das placas combustível com folgas variadas e folga padronizada</u>	68
5.6.1	<u>Folgas variadas</u>	68
5.6.2	<u>Folga padronizada</u>	72
5.7	<u>Inspeção da integridade dos núcleos</u>	73
5.8	<u>Descrição dos critérios adotados para as tolerâncias dimensionais e adoção do briquete como base para a definição do ajuste</u>	73
6	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	77

<u>6.1</u>	<u>Análise dos ajustes e tolerâncias produzidos no lote piloto</u>	77
<u>6.1.1</u>	<u>Incidência de trincas nas placas combustíveis do lote piloto</u>	79
<u>6.2</u>	<u>Caracterização dimensional dos briquetes utilizados nos lotes com folga variável e folga padronizada</u>	86
<u>6.3</u>	<u>Análise da incidência de trincas nas placas combustíveis com folga variável</u>	89
<u>6.4</u>	<u>Análise da incidência de trincas nas placas combustíveis com folga padronizada</u>	99
<u>6.5</u>	<u>Análise da incidência de trincas incipiente nas placas combustíveis</u>	106
<u>7</u>	<u>CONCLUSÕES</u>	114
<u>8</u>	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	116

1 INTRODUÇÃO

Os reatores de pesquisa são utilizados para diversos fins, incluindo pesquisa e treinamento, radiografia neutrônica, ensaios de materiais e produção de radioisótopos. Os radioisótopos produzidos pelos reatores de pesquisa são utilizados em várias áreas como na agricultura, na indústria e principalmente na medicina. O uso dos radioisótopos na medicina é o que traz os maiores e melhores benefícios para a sociedade, pois melhora a qualidade de vida das pessoas.

Conforme o Relatório de Gestão do Exercício de 2017 da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), mais de 300 clínicas e hospitais de diversos locais do País realizam procedimentos de medicina nuclear, que beneficiam mais de três milhões de pacientes por ano no Brasil e apresenta uma demanda crescente por este tipo de serviço, com uma taxa em torno de 10% ao ano.

As técnicas diagnósticas e terapêuticas foram avançando ao longo do tempo, devido ao surgimento de novos radioisótopos produzidos em reatores nucleares, e seus respectivos radiofármacos incorporados às práticas médicas. Destaca-se, entre eles, o gerador de molibdênio-99 (Mo-99), que fornece o radioisótopo mais utilizado em diagnóstico em medicina nuclear, o tecnécio-99m (Tc-99m). Essa tecnologia permite a visualização e estudo dinâmico do funcionamento de uma série de órgãos e sistemas no corpo humano, a exemplo do iodo 131 (I-131) que se estabeleceu para o diagnóstico e terapia de problemas relacionados à glândula tireoide.

As radiações ionizantes são utilizadas também em diversas terapias, principalmente no tratamento de câncer. Nesse caso, a irradiação das células cancerosas tem o objetivo de destruí-las e impedir sua multiplicação. Uma das formas de aplicação da radiação consiste em se colocar pequenas fontes em contato direto com a área do tecido a ser irradiada, técnica conhecida como “braquiterapia”. Essas fontes podem ser aplicadas por um determinado período e depois retiradas, por exemplo em tratamentos de câncer de útero, ou ser implantadas no corpo do paciente, como no tratamento de câncer de próstata, por meio de fios de irídio-192 e sementes de iodo-125 (IPEN, 2019).

Os radioisótopos aplicados na medicina nuclear são escolhidos pelas suas características de decaimento favoráveis e podem ser utilizados na sua forma química mais simples ou, então, incorporados a uma variedade de substâncias ou moléculas

sintetizadas, escolhidas pelas propriedades bioquímicas, fisiológicas e metabólicas favoráveis, tornando-se, assim, um fármaco adequado, ou radiofármaco. Na tabela 1 apresenta-se uma lista de radiofármacos com os radioisótopos associados e as aplicações na medicina nuclear.

Tabela 1 – Lista de radiofármacos com os radioisótopos associados e aplicações na medicina nuclear.

Fármacos	Radioisótopo	Aplicações
ECD	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Cérebro
Pertecnetato	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Glândulas salivares, estômago
Nal	Iodo - 123 ^(2a) Iodo - 131 ⁽³⁾	Tireóide
Estanho coloidal	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Fígado
Filato	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Fígado
MIAA	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Fígado
MAA	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾ e Iodo - 131 ⁽³⁾	Pulmão
MIBG	Iodo - 123 ^(2a) Iodo - 131 ⁽³⁾	Coração, tumores
Cloreto de Tálcio	Tálcio - 201 ^(2a)	Coração, tumores
SAH	Cromo - 51 ⁽⁴⁾	Intestino
Citrato de Gálio	Gálio - 67 ^(2a)	Tecidos moles, tumores, Infecção
EDTPM	Samário - 153 ⁽²⁾	Ossos
MDP	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Ossos
PIRO	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Ossos, coração
Dextran 500	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Sistema linfático
DMSA	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Rins
GHA	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Rins
DTPA	Tecnécio - 99m ⁽¹⁾	Rins
Hippuran	Iodo - 123 ^(2a) Iodo - 131 ⁽³⁾	Rins
FDG	Fluór - 18 ^(2a)	Coração, cérebro, infecção, tumores
In-DTPA-octreotídeo	Índio - 111 ⁽²⁾	Oncologia
Lu-octreotato	Lutécio - 177 ⁽⁴⁾	Oncologia
Y-Citrato	Ítrio - 90 ⁽⁴⁾	Radiosinoviotese
Y-Hidroxiapatita	Ítrio - 90 ⁽⁴⁾	Radiosinoviotese
Produto	Radioisótopo	Aplicações
* Fio de Iridio	Iridio - 192 ⁽²⁾	Garganta
* Sementes de Iodo	Iodo - 125 ⁽⁴⁾	Próstata, oftálmica, cerebral
* Fontes utilizadas em braquiterapia (1)Produzido a partir do molibdênio 99 - importado pelo IPEN-CNEN/SP. (2)Produção 100% nacional IPEN-CNEN/SP. (2a)Produção 100% nacional em Ciclotons. (3)30% produção nacional - IPEN-CNEN/SP e 70% importado. (4) 100% importado.		

Fonte: MRS (2013).

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) é a unidade de pesquisa da CNEN responsável pela produção e distribuição de radioisótopos de origem em reatores nucleares e os radiofármacos que utilizam esses radioisótopos para uso em medicina nuclear.

Os reatores nucleares se classificam segundo alguns critérios, dentre os quais: o elemento físsil presente no combustível nuclear; a energia dos nêutrons em que ocorrem as fissões nucleares; a combinação do conjunto composto pelo combustível nuclear e pelo moderador; o tipo de moderador; o tipo de fluido refrigerante e, principalmente, a finalidade a que se destinam.

Considerando a finalidade, os reatores se agrupam principalmente em: Reatores Nucleares de Pesquisa e Reatores Nucleares de Potência. Os primeiros, que será foco deste trabalho, são utilizados como fontes de nêutrons para múltiplos propósitos, desde a área da Física Nuclear até irradiações para produção de radioisótopos. Os Reatores de potência, em geral, são projetados para geração de energia elétrica.

O Reator Multipropósito Brasileiro, que é um reator de pesquisa conhecido como RMB, visa a produção de radioisótopos para aplicação na saúde (principalmente o Mo99), indústria e meio ambiente, teste de irradiação de combustíveis nucleares avançados, irradiação e teste de materiais, realização de pesquisas científicas em física nuclear e aplicação de feixe de nêutrons em apoio a pesquisas científicas e tecnológicas desenvolvidas em várias áreas do conhecimento.

A proposta de construção e operação do Reator Multipropósito Brasileiro - RMB foi estabelecida em 2007 como meta do Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação - PACTI do Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação - MCTI (Linha de Ação 18 do PACTI 2007 – 2010). O RMB é um empreendimento estruturante, de arraste tecnológico para o setor nuclear e de importância fundamental para viabilizar objetivos estratégicos do país referentes ao programa nuclear brasileiro em atendimento às necessidades da sociedade.

Na figura 1 apresenta-se as características gerais do projeto do Reator Multipropósito Brasileiro.

Figura 1 - Características gerais do projeto do reator RMB.

Fonte: CNEN (2008).

Do lado esquerdo são apresentados os “produtos” da operação do RMB, destacando-se a produção de radioisótopos, a irradiação e teste de combustíveis e materiais, e as diversas aplicações possíveis com feixes de nêutrons. Do lado direito, estão colocadas as “necessidades” para o projeto, construção, comissionamento, licenciamento e operação do RMB (CNEN, 2008).

O RMB será um reator do tipo piscina aberta que usará urânio de baixo enriquecimento (Low Enriched Uranium - LEU) como combustível nuclear. Terá potência de 30 MW com projeto baseado no reator OPAL (Open Pool Australian Lightwater). O núcleo do reator será compacto, visando a atingir um fluxo de nêutrons superior a 2×10^{14} neutrons.cm⁻² e terá elementos combustíveis do tipo MTR (Materials Testing Reactor) com placas planas. Será refrigerado e moderado a água leve desmineralizada, que fornecerá a blindagem radiológica em todas as condições de operação do reator.

Em reatores de piscina aberta, o núcleo do reator é imerso em uma piscina profunda de água desmineralizada. A coluna de água sobre o núcleo fornece blindagem radiológica para os operadores na sala do reator ao mesmo tempo em que permite fácil acesso ao núcleo (PERROTTA; SOARES, 2015). A água da piscina também refrigera a região externa ao núcleo durante as operações e o próprio núcleo (circulação natural) após o desligamento, retirando calor residual.

O contorno do núcleo do reator RMB será circundado com aproximadamente 75% por água pesada, que servirá como refletor de nêutrons, e incluirá uma instalação para acomodar dispositivos para fornecer feixes de nêutrons para experimentos a serem localizados dentro do saguão do reator (PERROTTA; SOARES, 2015). O outro lado do núcleo que não será circundado pelo tanque de água pesada terá uma placa de berílio que também atuará como refletor de nêutrons.

Toda a estrutura do núcleo estará localizada dentro de uma seção transversal retangular denominada “chaminé”, que será envolvida por refletores de berílio e/ou água leve/água pesada, onde serão posicionados dispositivos de irradiação tanto para teste de materiais como para produção de radioisótopos. Este conjunto formará parte do circuito primário de refrigeração (PERROTTA; SOARES, 2015).

Na figura 2 é apresentado uma visão geral dos principais componentes do RMB.

Figura 2 - Perspectiva da piscina do reator RMB e descrição de seus componentes internos.

Fonte: CNEN (2008).

A refrigeração do núcleo do reator será por circulação forçada de água desmineralizada, no sentido ascendente. Em operação normal, o refrigerante será bombeado através dos canais do núcleo e então, via tubulações, para o trocador de calor antes de retornar para a entrada do núcleo (PERROTTA; SOARES, 2015).

Para a proteção do núcleo de eventuais quedas de objetos, será instalada uma grade de proteção removível no topo da chaminé que fará a proteção do núcleo.

Os principais objetivos do RMB e das instalações nucleares e radioativas associadas serão: produção de radioisótopos e radiofármacos visando suprir a demanda nacional, inclusive do molibdênio-99 gerador do tecnécio-99m, o qual não é produzido no país; irradiação e teste de combustíveis nucleares e materiais estruturais visando avaliar a integridade estrutural destes quando submetidos a altas doses de radiação; e desenvolvimento de pesquisas científicas e tecnológicas utilizando feixe de nêutrons.

As instalações e infraestrutura associadas ao complexo do RMB estarão localizadas num terreno de aproximadamente 200 hectares a 580 metros acima do nível do mar, no município de Iperó no estado de São Paulo. Esse terreno é contíguo ao Centro Experimental Aramar (CEA), local onde é desenvolvido parte do Programa de Desenvolvimento de Propulsão Nuclear da Marinha do Brasil, operado pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP).

O complexo terá, além do reator nuclear de pesquisa, toda uma infraestrutura de laboratórios para realizar um grande conjunto de atividades, sendo, da forma concebida, um catalisador para um grande centro de pesquisa nacional de aplicação de radiação para benefício da sociedade. Na figura 3 apresenta-se a planta esquemática do complexo do RMB.

São as seguintes principais instalações e laboratórios que irão compor o complexo do RMB:

- a) Laboratório de processamento e manuseio de radioisótopos;
- b) Reator nuclear com fluxo de nêutrons apropriado às aplicações desejadas ($>2 \times 10^{14}$ neutrons.cm⁻².s) com potência nominal de 30 MW;
- c) Laboratório de feixe de nêutrons;
- d) Células quentes para processamento de ⁹⁹Mo e ¹³¹I;
- e) Células quentes para manuseio de radioisótopos com aplicação em medicina, indústria e outras aplicações;

Figura 3 - Planta esquemática do complexo do RMB

Fonte: GGN JORNAL (2015).

- f) Laboratório de análise pós-irradiação, com células quentes para análise pós-irradiação de combustíveis e materiais;
- g) Edifício com guias de nêutrons e salão de experimentos;
- h) Infraestrutura para pesquisadores e funcionários;
- i) Circuitos experimentais para testes de irradiação de combustíveis e materiais;
- j) Equipamentos diversos para análises de base científica e tecnológica;
- k) Laboratório de radioquímica e aplicação de técnica de ativação por nêutrons;
- l) Instalações de tratamento e armazenamento dos rejeitos radioativos.

As principais contribuições do empreendimento ao País estão listadas abaixo.

Para a área da saúde:

- a) Nacionalização da produção do ^{99}Mo , garantindo autonomia e soberania no fornecimento do $^{99\text{m}}\text{Tc}$ e assegurando atendimento da demanda da população brasileira, com possibilidade de exportar a produção excedente;
- b) Nacionalização dos principais radioisótopos produzidos em reatores, e que hoje são importados, para aplicação médica na diagnose, terapia e braquiterapia.

Para a indústria, meio ambiente e agricultura:

- a) Produção dos radioisótopos, atualmente importados, para aplicação em gamagrafia industrial;
- b) Ampliação da capacidade de produção de traçadores radioativos para aplicação em atividades de pesquisa de meio ambiente e agricultura.

Para a área estratégica de reatores de potência e ciclo do combustível nuclear:

- a) Capacidade para testar e qualificar combustíveis nucleares para propulsão naval, combustíveis avançados desenvolvidos para as centrais nucleares brasileiras, e novos combustíveis para reatores de pesquisa;
- b) Capacidade para testar materiais e processos especiais utilizados nos elementos combustíveis, vasos e estruturas internas dos reatores nucleares das centrais nucleares brasileiras e de propulsão naval;
- c) Contribuição ao uso contínuo e desenvolvimento das instalações do ciclo do combustível nuclear (produção de UF_6 , enriquecimento de U até 20%, produção de elementos combustíveis de reatores de pesquisa) garantindo ao país a soberania e o domínio tecnológico sustentável nessa área.

Para o fortalecimento da base científica e tecnológica:

- a) Ampliação da capacidade nacional existente em análise por ativação com nêutrons e aplicações de técnicas nucleares;

- b) Disponibilização de uma instalação de pesquisa de ponta na América Latina, podendo servir de polo de integração regional de pesquisa científica e tecnológica e formação de recursos humanos.

Na tabela 2 é apresentado um resumo dos radioisótopos e fontes para produção inicial no RMB que serão produzidos em posições de irradiação localizadas no tanque refletor, ao lado da estrutura que envolve o núcleo do reator.

Tabela 2 – Resumo dos tipos de radioisótopos a serem produzidos no RMB.

Tipo de Radioisótopo	Radioisótopo	Forma de Produção
Radioisótopo para radiofármacos Injetáveis	Mo-99	Irradiação de U-235
	I-131	Irradiação de U-235
	Cr-51	Irradiação de Cr-50
	Sm-153	Irradiação de Sm-152
	Lu-177	Irradiação de Lu-176
	Ho-166	Irradiação de Ho-165
	Y-90 (microesferas)	Irradiação de Y-89
	W-188	Irradiação de W-186
	P-32	Irradiação de S-32
Radioisótopo para braquiterapia	I-125	Irradiação de Xe-124
	Ir-192	Irradiação de Ir-191
Radioisótopo para a Indústria	Ir-192 - Industrial	Irradiação de Ir-191
	Co-60 (baixa atividade)	Irradiação de Co-59
	Se-75	Irradiação de Se-74
Radioisótopo tipo traçadores	Br-82	Irradiação de Br-81
	Hg-203	Irradiação de Hg-202
	I-131	Irradiação de U-235

Fonte: CNEN (2008).

Uma das etapas mais importantes na produção dos radioisótopos é a fabricação dos elementos combustíveis dos reatores. O IPEN, em sua história, já vem desenvolvendo e fabricando rotineiramente o tipo de combustível que será utilizado no reator RMB. Apesar disso, ao se tornar o responsável pelo fornecimento de todo o combustível necessário para a operação desses reatores de pesquisas, terá como desafio aumentar a produtividade das instalações para atender à futura demanda.

Estima-se que o reator RMB consumirá em torno de 50 elementos a uma potência de 30 MW e 270 dias de operação por ano.

Os elementos combustíveis do RMB serão do tipo MTR de $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ (siliceto de urânio disperso em matriz de alumínio) com enriquecimento de 19,75% de ^{235}U e densidade de até $4,8 \text{ gU.cm}^{-3}$, com um total de 21 placas combustível planas por elemento combustível.

Hoje, esse tipo de combustível é produzido no Brasil com tecnologia totalmente nacional, fato que é resultado do esforço realizado pelo grupo de fabricação de combustíveis do IPEN, no Centro do Combustível Nuclear, em resposta à dificuldade de adquirir esse combustível no mercado internacional.

2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Nenhuma informação está disponível na literatura sobre as dimensões usadas nos conjuntos para laminação, principalmente no que se refere ao tipo de ajuste ou da folga utilizada entre o briquete e a moldura. Tais informações não costumam ser publicadas por se tratar de procedimentos internos dos fabricantes desse tipo de combustível. Os ajustes adotados atualmente pelo IPEN foram desenvolvidos empiricamente na década de 1980. Na história do desenvolvimento da tecnologia de fabricação do combustível tipo placa no IPEN, a influência do ajuste entre o briquete e a moldura na integridade do núcleo combustível não foi estudada. Esse ajuste não está bem caracterizado no atual processo de fabricação adotado no IPEN, ou seja, não é totalmente conhecido.

Na produção das placas combustíveis no IPEN adota-se como procedimento de montagem do conjunto núcleo-moldura-revestimentos a montagem por interferência onde a moldura é aquecida a 440°C para dilatação da sua cavidade, e esta moldura é encaixada sobre o briquete que, após o resfriamento, é ajustado à cavidade da moldura por interferência.

Essa montagem com interferência é indesejável, pois o aquecimento da moldura é demorado e a montagem é trabalhosa e perigosa. Caso a moldura se contraia antes que o briquete esteja perfeitamente encaixado, a placa combustível não pode ser laminada e deverá ser retrabalhada. Se esse tipo de montagem puder ser eliminado, o processo de produção será simplificado e não mais será necessário o aquecimento da cavidade. Haverá a redução no tempo de produção e consequentemente redução do custo.

Outro ponto benéfico na eliminação da montagem com aquecimento é a redução dos riscos de acidente, pois na manipulação e exposição dos operadores a componentes quentes (440°C) há o risco de queimaduras.

Na fabricação de um lote piloto de placas combustíveis para validação de uma nova prensa de compactação e novo ferramental (matriz e punções) ocorreu o trincamento do núcleo de algumas placas combustíveis. Esse tipo de defeito ocorreu esporadicamente no início do desenvolvimento da tecnologia de fabricação das placas combustíveis, e foi eliminado quando a montagem por interferência foi adotada. Contudo, o reaparecimento desse tipo de defeito durante a validação do novo sistema de compactação mostrou a necessidade de se estudar sistematicamente o ajuste entre o briquete e a cavidade da moldura na montagem dos conjuntos para a laminação. Essa foi a motivação do presente trabalho.

3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da folga entre o briquete e a cavidade da moldura no aparecimento de trincas no núcleo da placa combustível durante a laminação, definindo-se o ajuste necessário entre a cavidade da moldura e o briquete a fim de produzir placas combustíveis cujos núcleos não apresentem trincas e que atendam aos padrões de integridade admitidos. Uma vez que os ajustes estejam caracterizados e sua influência no aparecimento de trincas no núcleo estiver totalmente conhecida, será proposto melhorias no processo de produção das placas combustíveis.

Caso seja verificado que um ajuste com folga positiva é viável, eliminando-se a necessidade de aquecimento da moldura e montagem por interferência, será identificada a folga máxima permitida para garantir que não ocorra o trincamento do núcleo durante a laminação, pois o trincamento não é admitido no processo de produção das placas

3.1 Objetivos Específicos

- a) Caracterização das folgas reais entre briquetes e cavidades no lote piloto composto por 47 placas combustíveis;
- b) Fabricação das placas combustíveis adotando-se folgas variando de 0,1 mm a 1,00 mm entre a cavidade da moldura e o briquete;
- c) Análise das radiografias quanto à incidência de defeitos de trincas com as folgas predefinidas;
- d) Proposta de uma especificação para as dimensões da cavidade da moldura para obtenção de uma faixa de folga padronizada (definição de tolerâncias);
- e) Validação da especificação por meio da fabricação de um lote de 20 placas combustíveis com a folga padronizada;

Incorporação da especificação dimensional para a cavidade da moldura no processo de produção do Centro do Combustível Nuclear (CECON).

4 REVISÃO DA LITERATURA

Os combustíveis do tipo MTR (Materials Testing Reactor) inicialmente usavam os núcleos formados por ligas de alumínio e urânio contendo 18% em peso de urânio altamente enriquecido - 93% em peso de ^{235}U (CUNNINGHAM; BOYLE, 1995) (KAUFMAN, 1962). Para não incentivar a proliferação das armas nucleares, em meados dos anos 50, os combustíveis para os reatores de pesquisa começaram a ser desenvolvidos com baixo enriquecimento de urânio - 20% em peso de ^{235}U . Para que a reatividade não fosse reduzida ao ponto de inviabilizar o combustível, tornou-se necessário o aumento da quantidade de urânio em cada placa combustível (CUNNINGHAM; et al, 1958) (HOLDEN, 1967).

Na época, entre a variedade de compostos de urânio que poderiam ser utilizados como o UAlx , o U_3O_8 , o U_3Si_2 , o U_3Si e o U_6Fe , o que se tornou mais promissor, em função de sua massa específica elevada foi o U_3Si_2 (SNELGROVE; et al, 1987) (SIMÕES, 1993) (TRAVELLI, 1997).

A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), na década de 1970, realizou um trabalho para minimizar o risco de proliferação de armas nucleares, pois nessa época, chegou-se a um total de aproximadamente 156 reatores de pesquisas em 34 países utilizando urânio altamente enriquecido, resultando numa circulação anual de aproximadamente 5.000kg deste material (TRAVELLI, 1980).

Então, concluiu-se que para reduzir a proliferação de armas, os núcleos dos reatores deveriam ser convertidos de: High Enriched Uranium (HEU) - Urânio de alto enriquecimento maior que 20% em átomos de ^{235}U – para: Low Enriched Uranium (LEU) - Urânio de baixo enriquecimento menor que 20% em átomos de ^{235}U . Com a utilização de compostos contendo alta densidade de urânio em matriz de alumínio em substituição as ligas metálicas de U-Al de alto enriquecimento que até então eram empregadas (NAZARE, 1984).

O Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos da América em 1978, lançou o programa "Reduced Enrichment for Research and Test Reactors" – RERTR, cujo 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).

Devido as dificuldades encontradas na fabricação das placas combustíveis com núcleos de liga U-Al com baixo enriquecimento, surgiu como alternativa a fabricação

dos núcleos por meio da metalurgia do pó, utilizando dispersões de compostos de urânio em alumínio e proporcionando a incorporação de grandes quantidades de urânio.

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.

O limite tecnológico para utilização de dispersões é de 45% em volume de material físsil disperso, uma vez que deve ser mantida uma matriz contínua de dispersante, no caso alumínio. Os silicetos de urânio e o U_6Fe foram inicialmente os compostos considerados promissores (SALIBA, 2011).

Porém, as altas densidades de urânio na dispersão somente podem ser conseguidas através da utilização na dispersão de compostos físeis com alto teor de urânio. Na figura 4 apresenta-se o potencial dos principais compostos de urânio.

Figura 4 - Densidade de urânio na dispersão em função da concentração da fase físsil dispersa para os principais compostos de urânio.

Fonte: SALIBA (2011).

A maior ênfase foi dada para o desenvolvimento de combustíveis para os reatores de pesquisas, com os elementos de combustível do tipo placa, uma vez que estes eram os maiores usuários de urânio com alto enriquecimento (ANL, 2010).

Os maiores problemas na utilização dos intermetálicos com alto teor de urânio na forma de dispersões em alumínio estão relacionados à instabilidade dimensional na operação, estes problemas, em sua maioria, são causados pela reação com a matriz de alumínio que produz um inchamento nas placas combustíveis e, por conseguinte, a problemas termo hidráulicos comprometendo a segurança do reator (SNELGROVE; *et al*, 1987) (COPELAND, 1987).

Em meados de 1988, a Comissão Reguladora Nuclear dos EUA emitiu a aprovação formal 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 e na sequência liberado para comercialização (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1988).

O primeiro reator de pesquisa que operou utilizando como combustível a dispersão de U_3Si_2-Al com elementos de alta concentração e baixo enriquecimento foi o ORR (Oak Ridge Research Reactor) (HROVAT, 1985), o combustível tinha aproximadamente 43% em volume de U_3Si_2-Al e densidade de urânio de $4,8 \text{ gU.cm}^{-3}$ (DOMAGALA; *et al*, 1980).

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. O documento fornece pontos de referência para os tipos, qualidade e integralidade de informações geradas durante o processo de qualificação de um novo combustível, de maneira a garantir desempenhos aceitáveis dos combustíveis para uso em reatores de pesquisas, apresentando abordagens para as fases do desenvolvimento e da qualificação sob irradiação.

Hofman, Meyer e Ray selecionaram e testaram ligas com o mais alto teor possível de urânio que apresentaram boa estabilidade da fase gama em baixas temperaturas e bom desempenho neutrônico (HOFMAN; MEYER; RAY, 1988). Combinações de Zr-Nb e Mo mostraram-se efetivas, mas a tendência é a de se trabalhar com ligas binárias. A liga U-5%Mo é equivalente em densidade de urânio ao U_6Fe , ligas nessa faixa de densidade de urânio, correspondendo a concentrações de urânio na dispersão de mais de $7,5 \text{ gU.cm}^{-3}$, são as próximas metas do programa

RERT, possibilitando a conversão para baixo enriquecimento na maioria dos reatores de pesquisas ao redor do mundo.

O molibdênio é o elemento que apresenta a maior solubilidade em urânio (aproximadamente 35%) e um bom compromisso entre a quantidade necessária para estabilizar a fase gama e a concentração de urânio que se espera em termos de exigências do programa RERT, portanto, o desafio é desenvolver um procedimento de fabricação de placas combustíveis que não promova a reação da liga U-Mo com a matriz de alumínio da dispersão e que apresente um bom desempenho em altos ciclos de queima sob os testes de irradiação (VAN THYNE, 1957).

Portanto, atualmente, a mais avançada tecnologia de fabricação de placas combustíveis tipo MTR disponível comercialmente está baseada na dispersão U_3Si_2 -Al, que resulta numa densidade de urânio no núcleo da placa combustível de $4,8gU.cm^{-3}$.

4.1 Processo de fabricação de elementos combustíveis

De modo geral, o processo de fabricação de elementos combustíveis tipo dispersão de siliceto de urânio (U_3Si_2) em alumínio (Al), como o fabricado no IPEN/CNEN-SP, pode ser apresentado em forma de diagrama, como apresentado na figura 5.

Figura 5: Diagrama de blocos simplificado do processo de fabricação do elemento combustível.

Fonte: Autor.

A seguir, será descrito, de forma geral, o processo de produção do combustível do tipo placa.

4.1.1 Pó de UF_4

A fabricação do combustível inicia-se com o processamento do hexafluoreto de urânio (UF_6). O UF_6 enriquecido a 20% em ^{235}U é atualmente obtido do Centro Tecnológico da Marinha, na sua unidade de Aramar (CTM-Aramar), São Paulo - SP, em cilindros tipo 5A, com peso líquido máximo 25 kg.

O UF_6 é transformado em uma solução de fluoreto de urânio (UO_2F_2) obtida por meio de hidrólise, sendo o UF_6 transferido para o interior do reator de hidrólise, onde reage com água, hidrolisando-se instantaneamente, formando-se a solução de fluoreto de urânio. O UF_6 liberado do cilindro é introduzido no reator de hidrólise por meio de um bico tipo Venturi acionado pela recirculação da solução aquosa de fluoreto de urânio formada. Inicialmente, o reator de hidrólise é preenchido com 25 litros de água deionizada, a qual reage com o UF_6 formando a solução de UO_2F_2 . O UF_6 é injetado no topo do reator onde é borbulhado na solução, reagindo imediatamente para a formação do fluoreto de urânio. Ao final da operação, obtém-se 50 litros de uma solução de UO_2F_2 com concentração de aproximadamente 40 g de urânio/litro.

A solução de fluoreto de urânio oriunda do reator de hidrólise é transferida para o reator de precipitação de tetrafluoreto de urânio (UF_4) e, neste reator, o urânio contido em solução é reduzido a U^{4+} utilizando-se como agente redutor o cloreto de estanho II (SnCl_2), sendo o urânio precipitado na forma de UF_4 mediante a adição de ácido fluorídrico (HF).

A suspensão obtida é transferida do reator de precipitação para o sistema de filtração. O UF_4 precipitado contido no filtro é recolhido manualmente, acondicionado em bandejas e introduzido em estufa para retirada da umidade. Posteriormente o UF_4 seco é enviado ao sistema de secagem para retirada da água de cristalização. O material é acondicionado no interior de uma retorta, a qual é posteriormente inertizada com um fluxo de argônio e inserida em uma mufla elétrica para aquecimento. O ciclo de secagem é de 1 hora a uma temperatura de 400°C . Após a operação de secagem, o UF_4 é retirado manualmente da retorta e acondicionado em recipiente hermético. O UF_4 obtido é a matéria-prima para a fabricação do urânio metálico e, posteriormente, do U_3Si_2 . No esquema da figura 6 é representado o processo de fabricação do pó de UF_4 a partir do UF_6 .

Figura 6 – Ilustração do processo de fabricação do pó de UF_4 a partir do UF_6 .

Fonte: JÚNIOR, R.B. (2013).

4.1.2 Urânio metálico

O pó de UF_4 é utilizado para a obtenção de urânio metálico por meio de uma reação magnesiotérmica em um vaso cilíndrico construído em aço resistente à temperatura, denominado Bomba de Redução. Este urânio metálico é, posteriormente, processado para obtenção do intermetálico U_3Si_2 por fusão por indução, dando origem a um lingote. O pó de UF_4 é pesado e inserido em um misturador do tipo V, instalado no interior de uma caixa de luvas e homogeneizado, garantindo homogeneidade nas suas características físico-químicas. Após essa homogeneização, o magnésio metálico previamente pesado é adicionado ao pó de UF_4 contido no misturador, formando-se a carga de redução.

A bomba de redução consiste em um vaso cilíndrico que permite o acoplamento, por meio de engate rápido (flange), de uma tampa que pode ser refrigerada com ar comprimido. O cadinho, confeccionado em grafite pirolítico, é inserido no interior do corpo da bomba já preenchido com a carga de redução. A mistura homogeneizada obtida de UF_4 e MgO é colocada no interior do cadinho de grafite que, por sua vez, é carregado na bomba de redução. A bomba carregada é inserida no interior do forno de redução. Inicia-se o processo de aquecimento do forno até um patamar em torno de $600^\circ C$. Sob esta temperatura, a bomba é evacuada várias vezes e purgada com argônio, mantendo-se uma pressão interna de 400 mbar. A temperatura, então, é elevada até que a carga é ignitada espontaneamente, ocorrendo a reação de redução:

Como resultado da vigorosa reação exotérmica, o urânio metálico é formado na reação do UF_4 com o Mg^0 , e se funde a $1130^\circ C$ e escorre, favorecido pela sua alta densidade, para o fundo do cadinho de grafite. A escória de fluoreto de magnésio (MgF_2) separa-se, deslocando-se para a superfície. O processo todo ocorre em poucos segundos. Finalmente, a bomba de redução é retirada do forno por meio da talha e resfriada. Após o resfriamento, a tampa da bomba é retirada e o cadinho de grafite contendo o lingote de urânio metálico e a escória de MgF_2 é desmontado, retirando-se os produtos obtidos. A superfície do lingote é limpa mecanicamente por meio de uma escova vibratória, retirando-se escória aderida superficialmente. Após esta limpeza mecânica, o lingote é decapado em uma solução de ácido nítrico a 10%, sendo, posteriormente, lavado com água corrente e seco ao ar. Na figura 7 representa-se o processo de obtenção de urânio metálico.

Figura 7 – Representação do processo de fabricação de urânio metálico.

Fonte: JÚNIOR, R.B. (2013).

Para a preparação da carga de fusão do U_3Si_2 as massas de grânulos de Si^0 e o lingote de U^0 são pesados na proporção desejada. A fusão é realizada num forno de indução equipado com um sistema de vácuo e controle de atmosfera. A carga é preparada colocando-se os pedaços de U^0 num cadinho de zircônia. Quando o cadinho é preenchido, o forno é fechado e evacuado e, posteriormente, preenchido com argônio até que seja atingida a pressão de 500 mbar. Depois que a carga é fundida, o forno é desligado e o banho é escoado para uma lingoteira de cobre. O lingote obtido na fusão é retirado do cadinho e separado da escória. Na figura 8 é ilustrado o processo de obtenção do siliceto de urânio.

Figura 8 – Ilustração do processo de fabricação de siliceto de urânio.

Fonte: JÚNIOR, R.B. (2013).

Os lingotes são transferidos para uma caixa de luvas com atmosfera inerte, de argônio, já que o U_3Si_2 é pirofórico. O U_3Si_2 é frágil e pode ser facilmente moído. No interior da caixa de luvas, o material é submetido à moagem preliminar, obtendo-se grânulos menores de 4 mm com a menor fração de finos ($< 44\mu m$) possível. Esta operação é realizada com o auxílio de um moinho manual. Uma vez realizada a moagem preliminar, o material é colocado diretamente sobre um conjunto de peneiras, sendo, em seguida, peneirado manualmente. O conjunto de peneiras compreende uma peneira grosseira de abertura 4 mm, uma peneira fina de abertura $150\mu m$ e um fundo. Os grânulos de diâmetro superior a 4 mm são novamente triturados. Os grânulos entre 4 mm e $150\mu m$ são coletados para a moagem final e as partículas menores do que $150\mu m$ são coletadas separadamente para posterior classificação granulométrica.

A moagem do material posterior à moagem preliminar é realizada em moinho de facas. O material coletado durante a moagem preliminar (entre 4 mm e 150 μm) é processado nesta etapa. A moagem é realizada cuidadosamente, com peneiramentos intermediários, para classificação do pó na faixa 150 a 44 μm . É permitida uma fração de finos, abaixo de 44 μm , máxima de 20 % em peso. A fração acima da especificação é recolhida num recipiente, sendo enviada novamente para o sistema de moagem final.

4.1.3 Briquetes

A próxima etapa do processo é a fabricação dos núcleos das placas combustíveis, que contém o material físsil, o U_3Si_2 . Esse núcleo é obtido por meio de técnicas de metalurgia do pó e é denominado briquete. Inicialmente, a massa e composição do briquete são calculadas com base nos valores analisados de urânio total e enriquecimento isotópico do pó de U_3Si_2 . O critério para o cálculo da massa do briquete é a quantidade do isótopo ^{235}U especificada para a placa combustível e as dimensões do briquete. Com base na massa calculada do briquete, as massas de pó de U_3Si_2 e pó de Alumínio são determinadas separadamente e homogeneizadas na proporção que garanta a quantidade de ^{235}U especificada, distribuída uniformemente.

Estas cargas de mistura são compactadas a frio e os briquetes são medidos e pesados. As dimensões finais do núcleo da placa combustível são especificadas e o volume do núcleo é calculado a partir destes dados pela multiplicação dos valores da espessura, largura e comprimento do núcleo. Isto corresponde ao volume do briquete a ser produzido. Para otimização da geometria final do núcleo laminado, o briquete possui cantos arredondados, sendo o volume dos cantos considerado no cálculo do volume e, portanto, da espessura do briquete.

A diferença entre o volume do briquete, obtido como descrito acima, e o volume do pó de U_3Si_2 , determinado pela divisão entre a massa de pó e a sua densidade, determina o volume de pó de alumínio que deve ser adicionado à massa do briquete. Como a densidade teórica do sistema não pode ser atingida durante a compactação do briquete, o volume de alumínio é reduzido pelo volume de poros que permanecem após a compactação. A massa total do briquete é dada pela massa calculada de pó de material físsil somada à massa calculada de pó de alumínio.

De acordo com o cálculo das massas de U_3Si_2 e de alumínio, os pós são pesados separadamente, preparando-se apenas uma carga por pesagem. A pesagem é realizada em frascos especialmente projetados para sua instalação no homogeneizador. Uma vez pesados os pós, a carga é homogeneizada no interior de uma caixa de luvas com atmosfera inerte. Esta homogeneização garante que a quantidade especificada de ^{235}U esteja distribuída homogeneamente no briquete a ser compactado. Após a homogeneização, o cuidado no manuseio da carga é crítico para evitar-se segregação.

As cargas já homogeneizadas são compactadas sob temperatura ambiente para obtenção de briquetes, utilizando-se uma prensa hidráulica com capacidade de 700 toneladas, e que se encontra confinada em caixa de luvas. A pressão de compactação é ajustada para a obtenção da espessura desejada, mantendo-se uma porosidade residual no briquete entre 5 e 7% em volume. O frasco contendo a carga homogeneizada é transferido da caixa luvas de homogeneização para a caixa de luvas de compactação. A cavidade da matriz e o punção são lubrificados com uma solução de ácido esteárico com acetona e a carga de um briquete é esvaziada sobre a cavidade da matriz. O pó é colocado em camadas com o auxílio de um aplainador especial para evitar segregação e minimizar a amplitude da espessura do briquete, abaixando-se o punção inferior gradualmente até que toda a carga esteja carregada.

Em seguida, o punção superior é introduzido e a pressão é aplicada, sendo mantida por 15 segundos. O conjunto da matriz é, então, aberto ejetando-se briquete, o qual é retirado manualmente. A espessura do briquete é definida com base nas especificações finais do núcleo da placa combustível. Essa espessura é calculada teoricamente e depois ajustada por meio de testes de fabricação.

Logo após a compactação, os briquetes passam para uma caixa de luva intermediária onde são medidas suas dimensões do comprimento, largura e espessura. São embalados em papel alumínio e recebem uma numeração para identificação.

Na figura 9 apresenta-se a matriz de compactação sendo limpa para posterior carregamento.

Figura 9 – Foto apresentando a limpeza da matriz de compactação do briquete.

Fonte: Autor.

Posteriormente os briquetes são desgaseificados sob vácuo dinâmico mínimo de 2×10^{-3} torr numa retorta. A temperatura utilizada é de 250°C . Após a permanência na retorta de desgaseificação por uma hora, o briquete é mantido sob vácuo até que a temperatura ambiente seja atingida. Assim, os briquetes que irão compor o núcleo das placas combustíveis são utilizados na nova fase de processamento, ou seja, a montagem dos conjuntos para laminação. Na figura 10 é ilustrado o processo de preparação dos briquetes.

Figura 10 – Ilustração do processo de preparação dos briquetes e desgaseificação.

Fonte: JÚNIOR, R.B. (2013).

4.1.4 Fabricação das placas combustíveis

As placas de moldura e revestimento são fabricadas a partir de placas de alumínio comerciais, da liga Alumínio 6061, que possui aproximadamente 1,0% de Mg, 0,6% de Si, 0,3% de Cu e 0,2% de Cr (% em peso).

A liga de alumínio é recebida em tiras de chapas nas dimensões de aproximadamente 2.000 mm x 200 mm x 6,34 mm. As tiras são laminadas até a espessura de 3,80 mm.

Na figura 11 é apresentada uma foto do laminador onde é realizado o rebaixamento da espessura das tiras de alumínio:

Figura 11 – Foto do laminador utilizado no processo de rebaixamento da espessura das tiras de alumínio.

Fonte: Autor.

O processo de laminação provoca deformações plásticas no material, resultando no empenamento nas tiras, como pode ser observado nas figuras 12, 13 e 14. Para a continuidade do processo, as tiras são desempenadas e alinhadas utilizando-se de macete plástico e mesa de desempeno, conforme ilustra-se na figura 13.

Figura 12: Fotos da tira da chapa de alumínio empenada após o processo de laminação.

Fonte: Autor.

Figura 13 – Foto da tira de alumínio e do macete de borracha sobre a mesa de desempeno.

Fonte: Autor.

As tiras de chapa desempenadas são cortadas por cisalhamento em guilhotina nas dimensões de 220 mm x 120 mm e passam novamente pelo desempenamento, como ilustra-se na figura 14:

Figura 14 – Foto da tira de chapa cortada e desempenada.

Fonte: Autor.

O empenamento é verificado com régua de luz e mesa de desempeno. As placas desempenadas são fixadas em um dispositivo especial de fixação para a abertura da cavidade onde o briquete será alojado. Este dispositivo garante a fixação e o posicionamento das placas na mesa do centro de usinagem, conforme ilustra-se na figura 15.

Figura 15 – Foto do dispositivo de fixação das placas sobre a mesa do centro de usinagem.

Fonte: Autor.

O processo de abertura da cavidade nas placas de moldura é por fresagem. Neste processo é utilizado um centro de usinagem.

A ferramenta utilizada na usinagem da cavidade da placa moldura é uma fresa de topo de 2 cortes de aço rápido com diâmetro de 8 milímetros e adotado as seguintes características de usinagem: Rpm 18000; velocidade.

Para redução do atrito entre a ferramenta e a superfície em corte e diminuir a temperatura na região de corte, é utilizado fluido de corte Shell solúvel B, água e etanol. Conforme ilustra-se na figura 16.

Figura 16 – Foto da ferramenta de corte afixada no mandril e do fluido de corte utilizado no processo de usinagem para a abertura de cavidade na moldura.

Fonte: Autor.

A tecnologia de fabricação de placas combustíveis adota a tecnologia de montagem e laminação de um conjunto composto pelo núcleo (briquete), uma placa de moldura e duas placas de revestimento (CUNNINGHAM; KAUFMAN, 1962). Obtém-se, assim, após a laminação, uma placa contendo no seu interior o núcleo combustível totalmente isolado do meio ambiente, por meio do perfeito caldeamento entre o núcleo e a moldura com as placas de revestimento.

Na montagem dos conjuntos, a placa de moldura é encaixada no briquete apoiado numa placa de revestimento. A outra placa de revestimento é posicionada por cima. Este conjunto montado é preso numa morsa giratória na bancada e é soldado em suas bordas, fixando-se todos os componentes do conjunto. A soldagem é do tipo Tungsten Inert Gas (TIG) com argônio. Deposita-se um cordão contínuo de solda nas quatro arestas do conjunto, deixando-se livre as extremidades para escape do ar nos primeiros passes de laminação.

A fixação por soldagem é necessária para garantir que os componentes não se movimentem durante o processo de laminação. Na figura 17 ilustra-se o procedimento de montagem dos conjuntos para laminação.

Na figura 18 apresentam-se a bancada de fixação com o conjunto – moldura, revestimentos e briquete fixados e aguardando a soldagem.

Na figura 19 apresentam-se o técnico realizando o processo de soldagem na bancada de fixação.

A figura 20 apresenta um rack de armazenagem dos conjuntos que foram soldados e que aguardam o aquecimento e a laminação.

Os primeiros passes de laminação são realizados à quente. Portanto os conjuntos soldados são inseridos no forno de aquecimento de placas sob temperatura de 440°C. Na figura 21 apresenta-se os conjuntos soldados no forno de aquecimento.

Figura 17 - Esquema ilustrativo da montagem do conjunto núcleo-moldura-revestimentos.

Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2011.

Figura 18 – Fotos do conjunto moldura, revestimentos e briquete fixos na bancada de fixação preparados para o processo soldagem.

Fonte: Autor

Figura 19 – Fotos do técnico realizando a soldagem do conjunto moldura, revestimentos e briquete na bancada.

Fonte: Autor

Figura 20 – Foto do rack de armazenagem dos conjuntos soldados.

Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2011.

Figura 21 – Foto das placas soldadas no forno de aquecimento.

Fonte: VIEIRA (2011).

A laminação é um processo de transformação mecânica que consiste na redução da seção transversal por compressão, por meio da passagem do material entre dois cilindros de aço com eixos paralelos, como ilustra-se no esquema da figura 22.

Figura 22 – Esquema ilustrativo do princípio da laminação.

Fonte: Autor

Os conjuntos soldados, devidamente identificados, são inseridos no forno de aquecimento de placas por 60 minutos sob temperatura de 440°C. A laminação a quente é realizada em vários passes conforme programa estabelecido. Cada tipo de combustível adota temperaturas e esquema de redução por passe especificamente definido, de modo a controlar os defeitos terminais e as dimensões finais do núcleo. O laminador utilizado tem precisão de 0,025 mm, equipado com cilindros de laminação revestidos com cromo, com diâmetro de 127 mm.

Entre cada passe a quente, os conjuntos são reaquecidos por 15 minutos. Após o último passe a quente, as placas são novamente identificadas na mesma posição da identificação inicial, na área fora do núcleo, utilizando-se um marcador mecânico. A velocidade de laminação é constante, de aproximadamente 10 metros por minuto.

A laminação a frio é realizada no mesmo laminador adotado na laminação a quente. Nesta operação a espessura especificada é atingida com precisão. A redução a frio é de aproximadamente 10% em espessura, aplicada em um ou dois passes. Durante a laminação a frio, o comprimento do núcleo da placa é verificado, garantindo-se o atendimento da especificação de comprimento mínimo do núcleo e a espessura máxima da placa de combustível.

Na figura 23 apresenta-se a placa combustível entrando e saindo do laminador de rolos.

Figura 23 – Foto do laminador de rolos.

Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2011.

Após a laminação a frio, as placas recebem um corte prévio para facilitar o manuseio durante as operações subsequentes que são de aplainamento, radiografias, traçagem e corte final. As placas obtidas na laminação a frio apresentam suas superfícies onduladas, sendo necessária uma operação de aplainamento. Esta operação é realizada utilizando-se um aplainador de rolos, que consiste basicamente em um grupo de cilindros aplainadores e um sistema de ajuste destes cilindros. Esta operação ocorre com a passagem da placa entre os cilindros.

A próxima etapa é o corte final da placa nas dimensões especificadas. Este corte é realizado em guilhotina utilizando-se uma traçagem realizada no sistema de radiografia industrial, onde o núcleo é perfeitamente localizado na placa combustível, traçando-se, a partir da posição do núcleo, linhas que orientarão o corte final. A seguir, as placas serão desengraxadas em acetona e decapados numa solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10% em peso durante o tempo de 1 minuto, e a temperatura de 60°C. Feito isto, elas são lavadas em água corrente durante 1 minuto, neutralizadas em ácido nítrico (HNO₃) a 40 % em peso frio durante 1 minuto, lavadas novamente

em água corrente por 5 minutos, lavadas em água desmineralizada corrente por 5 minutos (*spray*), lavadas por imersão em água desmineralizada quente e secas manualmente com o auxílio de um secador de jato de ar quente.

Na figura 24 apresenta-se um desenho da placa combustível tradicional fabricada segundo essa tecnologia, ilustrando seu núcleo, da moldura e dos revestimentos.

Figura 24 – Ilustração da placa combustível laminada e apresentação do núcleo, da moldura e dos revestimentos.

Fonte: SALIBA (2011).

Na figura 25 apresenta-se a sequência simplificada de operações realizadas na fabricação de placas combustíveis.

As placas combustíveis acabadas são caracterizadas dimensionalmente, obtendo-se seu comprimento, largura e espessura.

Figura 25 - Sequência simplificada de montagem e laminação de placas combustíveis.

Fonte: VIEIRA (2011).

4.2 Processo de qualificação das placas combustíveis

4.2.1 Qualidade do caldeamento

Uma das primeiras verificações realizadas nas placas combustíveis é a qualidade do caldeamento, também conhecido como “*blister test*”. A verificação da qualidade do caldeamento é realizada logo após os passes de laminação a quente das placas. O teste consiste no recozimento das placas por uma hora na temperatura de laminação e em seguida as superfícies das placas são inspecionadas visualmente, verificando-se a existência de bolhas na superfície da área da região do núcleo da placa. Caso seja verificada a ocorrência de bolhas a placa combustível é rejeitada.

Também para verificar a qualidade do caldeamento entre as superfícies dos revestimentos de alumínio, com a moldura e com o núcleo combustível é realizado um teste de dobramento com parte das tiras restantes do corte final da placa combustível. Esse teste consiste na realização de uma sequência de movimentos extensivamente dobrando em 180° num sentido e dobrando novamente no sentido inverso, flexionando-as de um lado para o outro. Caso ocorram falhas de caldeamento, estas são detectadas por inspeção visual.

Na inspeção visual também é constatado a existência de riscos, ranhuras, marcas, manchas ou algum tipo de dano em suas superfícies, decorrentes do manuseio, que também inviabilizam o uso das placas.

4.2.2 Inspeção dimensional

As placas combustíveis são caracterizadas dimensionalmente, obtendo-se seu comprimento, largura e espessura. Em geral, são efetuadas três medições no comprimento, sete medições na largura e vinte e uma medições de espessura.

Após o corte final da placa combustível, são obtidas radiografias com o objetivo de verificação e do posicionamento do núcleo no alvo, assim como da verificação de seu comprimento e largura.

4.2.3 Radiografias

Outro controle realizado nas placas é por meio de radiografias, obtendo-se uma imagem digital. Nessa etapa é realizada a centralização do núcleo e a marcação

para orientar o corte final da placa combustível. Nessa etapa, as placas combustíveis são também identificadas.

Uma placa combustível é enviada para análise metalográfica para verificar as dimensões das espessuras dos revestimentos e do núcleo na sua região central e nas suas regiões terminais. A aprovação do lote de fabricação depende dessa caracterização, cujos resultados devem atender a especificação técnica da placa combustível, onde estas dimensões estão determinadas. As placas combustíveis que não atendem às especificações dimensionais são rejeitadas e encaminhadas para posterior recuperação do urânio nela contido.

Ajusta-se a imagem radiográfica para se obter um contraste que permite a observação de possíveis anomalias na região do núcleo combustível, tais como trincas, homogeneidade da distribuição de urânio, concentração localizada de partículas combustíveis, também conhecido como “*hot spots*”, e partículas combustíveis fora do núcleo, defeito conhecido como “*white points*”.

A homogeneidade da distribuição de urânio no núcleo da placa combustível é avaliada por meio de uma inspeção visual e comparação com uma radiografia padrão. Nessa avaliação as placas são consideradas aprovadas, em termos de homogeneidade, quando as radiografias apresentarem aparência mais homogênea do que a radiografia padrão estabelecida.

Após o corte final, orientado pela tracagem realizada no sistema de radiografia, as placas são encaminhadas para a radiografia final, onde são confirmadas as medidas relativas ao posicionamento do núcleo combustível em relação às bordas da placa combustível.

4.2.4 Defeitos terminais – “Dog-boning” e “Fish tail”

A cada vinte e quatro placas combustíveis produzidas é feita a caracterização dos defeitos terminais do núcleo, que são inerentes ao processo de laminação e se localizam nas extremidades do núcleo da placa de combustível, sendo denominados de “defeitos terminais”. Basicamente são o espessamento do núcleo em suas extremidades, conhecido como “*dog-boning*” e a deformação desigual nas extremidades do núcleo, conhecido como “rabo de peixe”, ou “*fish tail*”.

Esses defeitos são inevitáveis, pois estão associados à diferença entre as propriedades mecânicas do núcleo (U_3Si_2) e do material da moldura e revestimentos (liga de alumínio 6061). Na figura 26 ilustra-se esses dois tipos de defeito.

Figura 26 – Ilustração dos defeitos terminais característicos na fabricação de placas combustíveis denominados de “*Dog-boning*” e “*fish tail*”,.

A- Ilustração

B- Micrografias ópticas apresentando o espessamento do núcleo na extremidade

Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2011.

4.2.5 Defeitos terminais – Flecha

Outro defeito comum nesse tipo de tecnologia é o aparecimento da “flecha”, que resulta da deficiência de paralelismo entre os cilindros de laminação do laminador. Na figura 27 ilustra-se o defeito da flecha.

Figura 27 - Ilustração do defeito “flecha”.

Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2011.

Os defeitos terminais são minimizados e controlados pela aplicação de um regime de rotação apropriado durante a laminação das placas combustíveis. Geralmente, os conjuntos montados têm um número de identificação e uma marca “X” na placa de revestimento superior. Este tipo de identificação permite ao operador controlar o esquema da rotação do conjunto durante a laminação, desde o primeiro até o último passe de laminação. No primeiro passe a marca “X” está na superfície superior do conjunto, na extremidade oposta à extremidade que entra nos cilindros de laminação. Para o segundo passe, o conjunto é rodado 180° na sua direção longitudinal e 180° na sua direção transversal. Estas rotações são realizadas simultaneamente quando o conjunto sai do laminador no primeiro passe. Após as rotações, a marca “X” para o segundo passe está na superfície inferior do conjunto, na borda que entrará nos cilindros. Esse procedimento permite o controle dos defeitos terminais e da flecha. Na figura 28 apresenta-se o esquema de rotação utilizado.

Figura 28 - Ilustração do esquema de rotação adotado na operação de laminação da placa de combustível.

Fonte: Autor.

4.3 Trincas

Outro possível defeito é o trincamento do núcleo, que ocorre geralmente na borda longitudinal do briquete, como ilustra a figura 29. As manchas brancas que se iniciam na borda e se direcionam para o centro da placa caracterizam o trincamento do núcleo. Nessas localidades há falta de material físsil. Esse defeito não atende aos critérios de homogeneidade e são causa de rejeição da placa combustível.

Figura 29 – Ilustração de trincas na placa combustível por meio de positivo de radiografia

Fonte: Autor.

As causas desse tipo de defeito não foram até o momento determinadas. Uma das funções da moldura é proporcionar um suporte lateral para o briquete durante o processo de laminação, o qual tem uma componente de alargamento, além do alongamento. Se o briquete for menor do que a cavidade da moldura e o ajuste permitir um espaço exagerado entre eles, as bordas do briquete irão quebrar durante os primeiros passes de laminação. Essa é a possível causa para o aparecimento de fissuras nas bordas do núcleo da placa de combustível acabada, como ilustra a figura 29. Acredita-se que a tendência a trincar as bordas é mais pronunciada no centro do núcleo na direção da laminação, onde a flecha é máxima. Porém, não existem estudos publicados na literatura sobre as causas desse tipo de defeitos.

4.4 Montagem do elemento combustível

Os elementos combustíveis tipo placa são formados por meio da montagem de um conjunto de placas combustíveis igualmente espaçadas entre si, permitindo a

passagem de um fluxo de água que serve como refrigerador e moderador (SNELGROVE,1987).

O procedimento de montagem do elemento combustível descrito a seguir é baseado no combustível projetado para o reator IEA-R1 do IPEN. Contudo o processo básico de montagem aplica-se também ao elemento combustível que será usado no reator RMB.

O elemento combustível do reator IEA-R1 é constituído de 18 placas combustíveis, 2 suportes laterais (direito e esquerdo), 1 bocal, 1 pino de sustentação e 8 parafusos. As características dimensionais dos elementos combustíveis são especificadas. Todos os componentes estruturais do elemento combustível são adquiridos no mercado, e são fabricados de acordo com desenhos que são parte das especificações.

O processo se inicia com a montagem das placas combustíveis para a formação de um estojo. As placas são fixadas por cravamento nos suportes laterais (direito e esquerdo). Posteriormente, são fixados o bocal e o pino de sustentação. Após a limpeza e a inspeção, os elementos combustíveis são embalados e armazenados até o seu transporte para o reator. Na figura 30 apresenta-se as etapas do processo de montagem de elementos combustíveis.

Figura 30 – Ilustração das etapas do processo de montagem do elemento combustível.

Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2011.

No processo de cravamento, que é a fixação das placas combustíveis nos suportes laterais, as placas combustíveis são encaixadas nas canaletas, conforme apresenta-se na figura 31 e fixadas aos suportes laterais (direito e esquerdo) por

deformação das ranhuras existentes nas canaletas, conforme apresentado na figura 32.

Figura 31 – Foto da montagem das placas combustíveis nas canaletas dos suportes laterais.

Fonte: Autor.

Figura 32 – Fotos do equipamento e ferramenta utilizada na operação de cravamento das placas combustíveis nas canaletas dos suportes laterais para a formação do estojo.

Fonte: Autor.

Na figura 33 apresenta-se placas combustíveis fixadas mecanicamente aos suportes laterais, assim como detalhes das canaletas e respectivas ranhuras que são deformadas pela ação de um rolete.

Figura 33 – Foto da parte interna do estojo com destaque para as canaletas/ranhuras.

Fonte: Autor.

Após a fixação das placas combustíveis nos suportes laterais, formando-se o estojo, o próximo componente a ser instalado é o bocal. O bocal é utilizado para a fixação do elemento combustível na placa matriz do reator. Ele é fixado na extremidade inferior do estojo, montado por meio de parafusos. O bocal é alinhado ao estojo do elemento combustível por uma operação de ajuste dimensional, utilizando-se mesa de desempeno e traçador de alturas.

A furação para a fixação do bocal nas placas combustíveis externas é usinada com o bocal já fixado nos suportes laterais, com o auxílio de uma fresadora. Os parafusos utilizados são de alumínio e já se encontram devidamente limpos e qualificados. O aperto final é realizado após uma caracterização dimensional prévia, verificando-se o alinhamento do bocal no estojo. Caso o alinhamento não atenda à especificação, este é ajustado.

O pino de sustentação é utilizado para a manipulação do elemento combustível no interior da piscina do reator. Ele é instalado na extremidade superior do estojo montado, a qual contém dois furos e neles o pino é fixado por meio de rebitemento.

As cavidades das extremidades dos pinos são deformadas por pressão com o auxílio de uma fresadora e, dessa forma é feita a fixação.

Na figura 34 ilustra-se o elemento combustível e seus componentes descritos anteriormente.

Figura 34 - Esquema ilustrativo do elemento combustível fabricado no IPEN.

Fonte: VIEIRA (2011).

Uma vez qualificado, o elemento combustível é lavado num banho de álcool etílico e seco manualmente com o auxílio de um jato de ar quente. Após esta limpeza, é realizada uma inspeção visual, especialmente no interior dos canais de refrigeração, procurando-se detectar possíveis obstruções causadas por cavacos ou materiais estranhos. Após a lavagem e inspeção, o elemento combustível é embalado e transferido para o reator.

5 METODOLOGIA

A primeira fase do trabalho foi analisar e caracterizar as folgas entre briquetes e as cavidades das molduras usadas na fabricação de um lote piloto de 47 placas combustíveis, as quais apresentaram trincas como defeitos em seus núcleos. Esse lote foi previamente produzido com o objetivo de validar o ferramental (matriz e punções) e uma nova prensa de compactação para a produção dos briquetes. O objetivo foi buscar uma relação entre o tipo de ajuste e a incidência de trincas nas placas elaboradas a partir dessa mudança.

Baseado nesse estudo, foram definidas seis folgas entre briquetes e cavidades das molduras (folgas controladas) para montagem do conjunto para a laminação. Três conjuntos montados com cada uma das folgas predefinidas foram laminados segundo o procedimento padrão do CECON, obtendo-se dezoito placas combustíveis, as quais foram inspecionadas por radiografia quanto à ocorrência de trincas.

Uma vez constatada a ocorrência de trincas correlacionada à folga utilizada, foi definida uma folga máxima permissível, chamada folga padronizada, que foi adotada para a produção de um segundo lote de vinte placas combustíveis. O objetivo desta etapa foi qualificar a folga padronizada. Isso foi realizado por meio de inspeção radiográfica para verificação da ocorrência de trincas, procurando-se validar a tolerância especificada para as dimensões da cavidade da moldura de modo a garantir a folga padronizada.

Todos os briquetes utilizados neste trabalho foram produzidos segundo o processo tradicional adotado pelo Centro do Combustível Nuclear - CECON do IPEN, já descrito anteriormente neste trabalho.

Para a produção das dezoito placas com folgas variadas, foram selecionados os briquetes cujas dimensões garantiram com precisão as folgas planejadas.

Para a produção do lote de qualificação, de vinte placas com folga padronizada, os briquetes foram selecionados de maneira aleatória a fim de validar as dimensões e tolerâncias especificadas e por considerar que esse será o processo convencional de fabricação das placas, ou seja, qualquer briquete selecionado no lote de briquetes deverá montar na moldura e manter a folga padrão especificada.

5.1 Análise do processo de fabricação do lote piloto de placas combustíveis

Foi feito um acompanhamento e análise do processo de fabricação do lote piloto de placas combustíveis no CECON, caracterizando-se as dimensões das cavidades das molduras e as folgas reais usadas na montagem dos conjuntos de laminação.

A análise foi realizada com base nos relatórios de qualidade que são elaborados pela área de produção do CECON.

A análise foi realizada a fim de caracterizar as placas produzidas no lote piloto, considerando a incidência de trincas, procurando-se uma relação entre as trincas observadas e a folga no ajuste do briquete na cavidade das molduras. Essa folga foi considerada a principal possível causa para o trincamento do núcleo.

Partiu-se do princípio que é impossível fabricar peças, nesse caso, molduras e briquetes com dimensões exatas, ou seja, sempre haverá variação dimensional entre uma peça e outra e essa característica é inerente ao processo produtivo de usinagem por remoção de materiais.

Portanto, para as fabricações mecânicas em que há montagem de peças uma com a outra é imprescindível o uso das tolerâncias dimensionais. Esse foi o principal aspecto estudado e discutido nessa dissertação.

5.2 Descrição do dimensionamento das folgas variadas

Foram definidos seis níveis de folga entre o briquete e a moldura, sendo a cavidade da moldura sempre maior do que o briquete visando a eliminação da montagem por interferência, de forma a facilitar a montagem entre a moldura e o briquete eliminando o aquecimento da moldura a 440°C.

Como ponto de partida, foi utilizado as dimensões dos briquetes produzidos segundo o processo tradicional adotado pelo Centro do Combustível Nuclear do IPEN. Essas dimensões foram usadas como referência para a definição das folgas.

Foi identificado que a maioria, ou seja 94%, das dimensões de comprimento dos briquetes situam-se entre 89,65 mm e 89,64 mm. Para a largura, 97% dos briquetes apresentaram nessa dimensão as medidas entre 62,61 mm a 62,63 mm.

Adotou-se, então, como dimensões de referência do briquete as seguintes medidas: 89,65 mm para o comprimento e 62,60 mm para a largura.

As folgas definidas para serem aplicadas nas cavidades das molduras foram de: 1,00 mm; 0,80 mm; 0,60 mm; 0,40 mm; 0,20 mm e 0,10 mm. Para cada uma das folgas estabelecidas, definiu-se a produção de três placas. Na tabela 4 é apresentada as dimensões definidas para as molduras.

Tabela 4 - Dimensões planejadas para a abertura das cavidades nas molduras.

Dimensões das Cavidades em mm			
		Comprimento	Largura
Folga 1	1,00	90,65	63,60
Folga 2	0,80	90,45	63,40
Folga 3	0,60	90,25	63,20
Folga 4	0,40	90,05	63,00
Folga 5	0,20	89,85	62,80
Folga 6	0,10	89,75	62,70

Fonte: Autor.

5.3 Descrição do processo de produção das dezoito molduras com folgas variadas

Após a definição das dimensões, as cavidades das molduras foram usinadas nas oficinas do SENAI-SP por meio de usinagem de precisão num centro de usinagem.

O material utilizado nas molduras e nos revestimentos foi cedido pelo CECON do IPEN. Esse material é o mesmo empregado na fabricação rotineira de placas combustíveis, sendo a liga de alumínio 6061, que possui como elementos de liga o magnésio e o silício.

Conforme a ABNT NBR 6844, a liga de alumínio 6061 possui aproximadamente 1,0% de Mg, 0,6% de Si, 0,3% de Cu e 0,2% de Cr (% em peso). Essa liga é utilizada principalmente pela facilidade de extrusão, baixa densidade, resistência a corrosão, boa soldabilidade e preço atrativo. Para a fabricação de placas combustíveis, essa liga é usada devido à sua maior resistência mecânica quando comparada ao alumínio de pureza comercial (liga 1100), o que resulta em menores defeitos terminais após a laminação.

Para a usinagem das cavidades das molduras, o alumínio foi recebido em tiras com espessura de 6 mm, as quais foram laminadas a quente em temperatura de

440°C até se atingir a espessura de 3,80 mm. Esse material foi cortado por cisalhamento em guilhotina nas dimensões de 220 mm x 120 mm.

Apesar de no processo tradicional do IPEN as dimensões externas da moldura não serem usinadas, para garantir o posicionamento da moldura no sistema de fixação do centro de usinagem, foi realizado o aplainamento, nivelamento e usinagem no comprimento e na largura das molduras, retirando-se o mínimo de material. Na figura 35 apresenta-se o processo de aplainamento e nivelamento da matéria prima da moldura em prensa hidráulica e verificação da planicidade com régua de luz.

Figura 35 - Endireitamento e verificação do aplainamento da placa da moldura.

Fonte: Autor.

Após o endireitamento as placas foram usinadas nos contornos externos a fim de uniformizar as dimensões e facilitar a fixação na máquina de usinagem. Na figura 36 apresenta-se a moldura posicionada no sistema de fixação do centro de usinagem e a ferramenta utilizada para essa uniformização do comprimento e da largura.

Figura 36 – Foto de moldura presa no sistema de fixação do centro de usinagem para a uniformização do comprimento e largura.

Fonte: Autor.

O Centro de Usinagem utilizado na usinagem foi fabricado no ano de 2007 e tem as seguintes características principais:

Dimensões: Comprimento 2200mm, largura 2550mm e altura 2790mm;

Dimensões da mesa: Comprimento 840mm e largura 360mm

Rotação máxima do eixo árvore: 7500 rpm

Tensão e Corrente: 220V e 52,5 A

Peso: 3,4 ton

Potência: 15 cv

Comando Numérico: GE Fanuc 21i-MB

Marca: Romi, modelo 560D.

Os parâmetros de corte utilizados para a usinagem da cavidade da moldura foram:

Velocidade de Corte (V_c): 125m/min;

Rotação (n): 4000 rpm;

Avanço por arresta (F_z): 0,22mm;

Avanço (V_f): 1800mm/min.

As molduras foram fixadas no sistema de fixação do centro de usinagem, usando como referencial um suporte a fim de facilitar o posicionamento das peças, considerando que foram produzidas 18 peças nesta fase. Nas figuras 37, 38 e 39 apresentam-se a placa de moldura fixada no sistema de fixação, o suporte e o comando numérico utilizado.

Figura 37 – Foto da moldura afixada no sistema de fixação do centro de usinagem.

Fonte: Autor.

Figura 38 – Foto da placa afixada no suporte do centro de usinagem e os pontos de referência sinalizados.

Fonte: Autor

Figura 39 – Foto do comando a CNC do centro de usinagem.

Fonte: Autor.

Para a usinagem da cavidade da moldura foi utilizado uma fresa de topo da marca Metal Carb, modelo STD-KB 300 P de metal duro de duas arestas de corte e diâmetro de 10 mm, conforme está ilustrado na figura 40.

Figura 40 – Foto da fresa de topo de duas arestas de corte.

Fonte: Autor.

A operação de abertura da cavidade da moldura é um processo de usinagem mecânica realizado pelo centro de usinagem e ferramenta de corte, denominada fresa. A operação é denominada fresagem e consiste na retirada de metal a fim de produzir a cavidade desejada. A operação é realizada pela combinação de dois movimentos efetuados ao mesmo tempo, sendo eles a rotação de ferramenta (fresa) e o movimento da mesa da máquina onde a peça a ser produzida está fixada.

É o movimento da mesa da máquina ou movimento de avanço que leva a peça até a fresa e torna possível a operação de usinagem. O movimento utilizado no processo foi o discordante, quando a moldura é levada contra o movimento de giro dos dentes da fresa.

As dimensões externas e a cavidade da moldura foram medidas com paquímetro digital com capacidade de 150 mm e exatidão de $\pm 0,02\text{mm}$. Este instrumento pode ser exposto a líquidos refrigerantes, água, poeira e óleo. É um instrumento com face de metal duro nos bicos, haste de profundidade cilíndrica e mostrador digital. Na figura 41 é apresentado o instrumento de medição utilizado nas medições da moldura.

Figura 41 – Foto do paquímetro quadrimensional de 150 mm.

Fonte: Autor.

O paquímetro possui certificado de inspeção do fabricante e, para garantir a exatidão da medição foi utilizado um anel padrão para comparação. O anel padrão é utilizado para a calibração (zeragem) de instrumentos de medições internas, fabricado em aço temperado com faces de contato micro lapidadas, produzido com alta precisão de acordo com norma DIN 2250. Na figura 42 apresenta-se uma foto do anel padrão com dimensão de 25 mm.

A medição do comprimento e da largura das cavidades das molduras e dos briquetes foram realizadas em dois pontos. A medição das larguras da cavidade das

molduras e do briquetes foram realizadas em três pontos. As medições reais adotadas e apontadas nas tabelas apresentadas neste trabalho foram as de maiores medidas encontradas nos pontos de medição.

Figura 42 – Foto do anel padrão de 25,00 mm.

Fonte: Autor.

5.4 Descrição do dimensionamento da folga padronizada

Com a experiência adquirida na etapa anterior, ou seja, produção de dezoito placas com folgas variadas, foi estabelecida uma folga padronizada e aceitável para o processo produtivo das placas combustíveis.

Como o processo de produção dos briquetes está bem caracterizado e apresenta boa estabilidade dimensional, a ênfase para a definição da folga padronizada foi dada no dimensional da cavidade da moldura.

Os principais critérios adotados para a definição da folga padronizada foram:

- Obtenção de placa de combustível íntegra sem o defeito de trincamento do núcleo;
- Facilidade e redução de tempo na montagem entre a moldura e o briquete, eliminando-se a montagem por interferência de forma a dispensar o aquecimento a 440°C da moldura para a montagem do briquete na cavidade;
- Redução do risco de acidente de trabalho, ou seja, de queimaduras com a manipulação de peças quentes;

- Facilidade e redução de tempo para a produção das molduras, buscando-se a tolerância mais ampla possível, facilmente reproduzida em máquinas com Comando Numérico Computadorizado (CNC);
- Intercambialidade das peças, de modo que qualquer moldura com qualquer briquete irá montar mantendo a folga padrão estabelecida.

5.5 Descrição do processo de produção das vinte molduras com folga padronizada

Da mesma forma do que as dezoito placas foram usinadas nas oficinas do SENAI – SP, as vinte molduras com folgas padronizadas também passaram pelos mesmos processos, máquinas, ferramentas e sequência de operações.

As dimensões externas e a dimensões da cavidade da moldura foram medidas com o mesmo paquímetro digital já apresentado anteriormente.

5.6 Descrição do processo de montagem e laminação das placas combustível com folgas variadas e folga padronizada

5.6.1 Folgas variadas

Para as folgas variadas, foram selecionados os briquetes e realizada a abertura das cavidades nas molduras, de modo a obter-se os seis níveis de folga investigados o mais próximo possível da folga nominal planejada. Na figura 43 é ilustrado o conjunto que inclui a moldura, o briquete e o revestimento, prontos para a fixação por solda. Tendo em vista os menores valores das folgas de 0,1 mm e 0,2 mm, nessa etapa as molduras foram aquecidas para garantir a inserção dos briquetes nas cavidades das molduras.

Os conjuntos montados foram presos na bancada de soldagem e soldados, fixando-se todos os componentes do conjunto. Na figura 44 é apresentado algumas das placas montadas, soldadas e prontas para a fase de laminação. Esse é o procedimento padrão de montagem e soldagem adotado pelo Centro de Combustível Nuclear do IPEN.

A figura 45 apresenta o esquema ilustrativo do conjunto revestimento, moldura e briquete montados, soldados e preparados para o processo de laminação.

Cada conjunto foi laminado individualmente segundo o programa de passes de laminação tradicional, apresentado nas tabelas 5 e 6. Os números que identificam as placas combustíveis estão apresentados nos quadros.

Figura 43 – Fotos do conjunto montado composto pela moldura, briquete e as revestimentos.

Fonte: Autor.

Figura 44 – Fotos das placas soldadas acomodadas em suporte especial.

Fonte: Autor.

Figura 45 - Esquema ilustrativo do conjunto montado, soldado e pronto para o processo de laminação.

Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2011.

Tabela 5 - Programa de laminação adotado na fabricação das placas combustíveis.

Laminação a quente				
Aquecimento: 440°C		Tempo 60 min.		Lam. 01/19
Placas laminadas: 01, 04, 05, 13, 18, 23, 25, 26 e 32		Espessura inicial do conjunto (mm)		
		Primeira - Placa 01	Última - Placa 32	Nominal
		10,45	10,27	9,80
Passe	% Redução	Nominal	Primeiro Real	Último Real
1	25,0	7,35	7,43	7,38
2	25,0	5,52	5,49	5,46
3	25,0	4,41	4,37	4,63
4	20,0	3,53	3,47	3,46
5	20,0	2,82	2,85	2,83
6	20,0	2,26	2,39	2,31
7	20,0	1,80	1,81	1,85
8	20,0	1,45	1,46	1,45
Laminação a frio				
Espessura nominal: 1,35 ± 0,2 mm				
Placas números	Primeiro passe		Segundo passe	
1	1,41		1,35	
4	1,4		1,34	
5	1,4		1,36	
13	1,38		1,36	
18	1,39		1,35	
23	1,38		1,36	
25	1,38		1,35	
26	1,38		1,38	
32	1,41		1,37	

Fonte: Autor.

Tabela 6 - Programa de laminação adotado na fabricação das placas combustíveis.

Laminação a quente				
Aquecimento: 440°C		Tempo 60 min.		Lam. 02/19
Placas laminadas: 02, 03, 06, 07, 09, 12, 22, 29 e 31		Espessura inicial do conjunto (mm)		
		Primeiro - Placa 02	Último - Placa 31	Nominal
		10,15	9,95	9,80
Passe	% Redução	Nominal	Primeira	Última
			Real	Real
1	25,0	7,35	7,45	7,39
2	25,0	5,52	5,53	5,52
3	25,0	4,41	4,46	4,33
4	20,0	3,53	3,51	3,52
5	20,0	2,82	2,76	2,78
6	20,0	2,26	2,30	2,26
7	20,0	1,80	1,80	1,81
8	20,0	1,45	1,55	1,55
Laminação a frio				
Espessura nominal: 1,35 ± 0,2 mm				
Placas números		Primeiro passe	Segundo passe	
2		1,45	1,36	
3		1,45	1,35	
6		1,46	1,36	
7		1,46	1,36	
9		1,46	1,36	
12		1,46	1,36	
22		1,46	1,34	
29		1,46	1,36	
31		1,46	1,34	

Fonte: Autor.

Os conjuntos soldados e devidamente identificados foram laminados a quente e a frio segundo o procedimento tradicional adotado pelo CECON para a fabricação regular das placas combustíveis. Nove placas combustíveis foram laminadas por lote, em dois lotes de laminação.

A cada passe de laminação os conjuntos retornaram ao forno, mantendo-os a uma temperatura de 440°C por 15 minutos. Na figura 46 ilustra-se a placa combustível sendo laminada.

Figura 46 – Foto do laminador, da placa entre os cilindros e do operador fazendo a condução da placa no processo de laminação.

Fonte: Autor.

5.6.2 Folga padronizada

Para as montagens com a folga padronizada não foi realizada a seleção dos briquetes. Para esse lote de placas a escolha dos briquetes foi aleatória, a fim de testar a intercambialidade das peças - briquete e moldura.

Nessa etapa os conjuntos foram montados sem o aquecimento da moldura a 440°C. Os conjuntos soldados e devidamente identificados foram laminados a quente e a frio segundo o procedimento tradicional adotado pelo CECON para a fabricação

regular das placas combustíveis. Cada conjunto foi laminado individualmente segundo o programa de passes de laminação tradicional, apresentado nas tabelas 7 e 8. Nessa etapa dez placas combustíveis foram laminadas por lote, em dois lotes de laminação. Os números que identificam as placas combustíveis estão apresentados nos quadros.

Como as placas combustíveis apresentam suas superfícies onduladas, após a laminação foi realizada uma operação de aplainamento em todas as placas combustíveis fabricadas. Isto foi realizado em uma máquina denominada “aplainador de rolos”, composta por cilindros superiores e inferiores, onde as distâncias dos cilindros podem ser ajustadas com o auxílio de relógios comparadores.

5.7 Inspeção da integridade dos núcleos

Concluída a fase de produção das placas combustíveis laminadas a partir de conjuntos com folgas variadas e com a folga padronizada, foi realizada uma inspeção visual a fim de verificar a ocorrência de trincas nos núcleos. As placas foram pré cortadas e radiografadas para verificação da integridade do núcleo. Para isso foi utilizada a radiografia de defeitos, obtida por exposição por 4 minutos e 20 segundos com tensão de 70 kV e corrente de 14 mA. Sob essas condições radiográficas é possível examinar o núcleo da placa combustível quanto à presença de trincas.

5.8 Descrição dos critérios adotados para as tolerâncias dimensionais e adoção do briquete como base para a definição do ajuste.

O conceito das tolerâncias dimensionais baseia-se na observação de que é impossível a fabricação de peças nas suas dimensões exatas, ou seja, a característica de variação é inerente a qualquer processo produtivo.

O ajuste entre os componentes de um conjunto é a condição para a fixação ou funcionamento entre peças executadas dentro de um limite e são determinados de acordo com o campo de tolerância entre as peças. O sistema de ajustes prevê três classes de ajuste, sendo eles:

- ajustes móveis ou deslizantes – ajuste com folga;
- indeterminados - ajuste incerto;
- ajustes fixos ou prensados – ajuste com interferência.

Esses tipos de ajustes são apresentados na figura 47:

Tabela 7 - Programa de laminação adotado na fabricação das placas combustíveis.

Laminação a quente				
Aquecimento: 440°C		Tempo 60 min.		Lam. 03/19
Placas laminadas: 08, 15, 21, 24, 34, 50, 52, 55, 57 e 58		Espessura inicial do conjunto (mm)		
		Primeiro - Placa 08	Último - Placa 58	Nominal
		10,14	9,83	9,80
Passe	% Redução	Nominal	Primeira	Última
			Real	Real
1	25,0	7,35	7,36	7,34
2	25,0	5,52	5,44	5,47
3	25,0	4,41	4,36	4,32
4	20,0	3,53	3,41	3,43
5	20,0	2,82	2,70	2,72
6	20,0	2,26	2,15	2,20
7	20,0	1,80	1,80	1,74
8	20,0	1,50	1,46	1,42
Laminação a frio				
Espessura nominal: 1,35 ± 0,2 mm				
Placas números		Primeiro passe	Segundo passe	
8		1,40	1,37	
15		1,39	1,36	
21		1,39	1,36	
24		1,39	1,36	
34		1,39	1,36	
50		1,38	1,36	
52		1,40	1,36	
55		1,39	1,34	
57		1,39	1,36	
58		1,38	1,34	

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Programa de laminação adotado na fabricação das placas combustíveis.

Laminação a quente				
Aquecimento: 440°C		Tempo 60 min.		Lam. 04/19
Placas laminadas: 10, 11, 14, 16, 17, 20, 39, 48, 56 e 59		Espessura inicial do conjunto (mm)		
		Primeiro - Placa 10	Último - Placa 59	Nominal
		10,14	9,83	9,80
Passe	% Redução	Nominal	Primeira	Última
			Real	Real
1	25,0	7,35	7,35	7,32
2	25,0	5,52	5,41	5,40
3	25,0	4,41	4,27	4,20
4	20,0	3,53	3,42	3,47
5	20,0	2,82	2,71	2,67
6	20,0	2,26	2,17	2,21
7	20,0	1,80	1,79	1,78
8	20,0	1,50	1,47	1,52
Laminação a frio				
Espessura nominal: 1,35 ± 0,2 mm				
Placas números		Primeiro passe	Segundo passe	
10		1,43	1,34	
11		1,42	1,36	
14		1,42	1,35	
16		1,44	1,36	
17		1,43	1,35	
20		1,44	1,34	
39		1,44	1,35	
48		1,43	1,35	
56		1,43	1,35	
59		1,43	1,35	

Fonte: Autor.

Figura 47 – Ilustração adaptada das classes de ajuste para acoplamento de eixos e furos (sistema furo-base).

Fonte: Adaptado da NBR 6158 (1995).

Nos ajustes com folga, a montagem é livre, manual, sem necessidade de uso de força, ferramentas, acessórios ou alteração de temperatura como aquecimento ou resfriamento.

Nos ajustes incertos, a montagem é incerta e depende da combinação dimensional entre os componentes.

Já para os ajustes com interferência, a montagem necessita de equipamentos como prensa ou a variação da temperatura, como aquecimento da moldura, processo empregado no CECON para a montagem dos briquetes nas molduras.

Na produção de peças e componentes algumas peças são mais difíceis de se manufaturarem do que outras, da mesma forma que algumas são também menos custosas para se fabricar.

No caso das placas combustíveis, a produção dos briquetes é mais complexa pois ele é produzido por metalurgia do pó, conferindo ao briquete dimensões, geometria e tolerância com repetibilidade, porém, de difícil adequação ou mudanças dimensionais.

Pelos motivos apresentados acima, para melhor aproveitamento dos briquetes e redução de custos as características dimensionais do briquete foram utilizadas como referência para as dimensões da cavidade da moldura, sendo o briquete considerado a base para a definição do ajuste a ser produzido.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de produção das placas combustíveis, de maneira geral, é robusto e confiável produzindo componentes que atendem aos padrões de qualidade exigidos pelos clientes do CECON quanto a qualidade do caldeamento, inspeções dimensionais, homogeneidade, defeitos terminais e inspeções visuais.

Os critérios acima descritos foram importantes para conhecimento geral dos processos e do entendimento da complexidade na produção do combustível para os reatores de pesquisa. O foco foi dado no defeito de trincamento do núcleo, os quais foram verificados nas radiografias das placas do lote piloto, na elaboração das placas com folgas variadas e com folgas padrão.

Nos estudos realizados, constatou-se alguns defeitos que serão abordados nos subitens abaixo.

6.1 Análise dos ajustes e tolerâncias produzidos no lote piloto

O Centro de Combustível Nuclear do IPEN produziu quarenta e sete placas combustíveis piloto, segundo as especificações do reator RMB a fim de validar o novo ferramental de compactação dos briquetes e o processo de fabricação das placas. Nesse lote piloto de validação, foram observadas trincas nos núcleos das placas produzidas. Por esse motivo, foi realizado um estudo para caracterização das folgas dimensionais utilizadas na fabricação dessas placas, procurando-se uma correlação entre as trincas observadas e o ajuste do briquete na cavidade das molduras. Essa folga foi considerada a principal possível causa para o trincamento do núcleo durante a laminação.

Quanto ao ajuste entre a cavidade das molduras e os briquetes foi identificado o tipo de ajuste utilizado entre o briquete e a cavidade da moldura, com folga ou interferência, nas dimensões de largura e do comprimento.

Analisando os ajustes reais usados nessas placas combustíveis, na dimensão do comprimento, foi encontrado em 61,70% dos casos o ajuste de folga entre as cavidades das molduras e os briquetes e 38,30% de ajuste de interferência, como apresentado nas tabelas 9 e 10:

Tabela 9 - Ajustes entre cavidade da moldura e briquete na dimensão do comprimento.

Ajuste entre Cavidade e Briquete		
Folga em relação ao COMPRIMENTO		
Quantidade de Folgas	29	61,70%
Quantidade de Interferências	18	38,30%
TOTAL	47	100%

Fonte: Autor.

No sentido do comprimento, o ajuste não será enfatizado por se tratar de uma zona de ocorrências de defeitos terminais como o “*fish tail*” e o “*dog-boning*” já ilustrados anteriormente.

No sentido da largura os ajustes encontrados foram de 65,96% dos casos com ajuste de folga entre as cavidades das molduras e os briquetes e 34,04% com ajuste de Interferência, como apresentado na tabela 10:

Tabela 10 – Ajustes entre moldura e briquete na dimensão da largura das placas estudadas.

Ajuste entre Cavidade e Briquete		
Folga em relação a LARGURA		
Quantidade de Folgas	31	65,96%
Quantidade de Interferências	16	34,04%
TOTAL	47	100%

Fonte: Autor.

O ajuste adotado pelo CECON no lote de placas piloto usado para validação do ferramental, como observado no estudo, foi o Incerto, pois em determinado momento o ajuste entre o briquete e a cavidade da moldura apresenta folga e em outro a incidência é de interferência.

6.1.1 Incidência de trincas nas placas combustíveis do lote piloto

Das quarenta e sete placas combustíveis produzidas com a especificação do RMB, cinco apresentaram na radiografia o defeito de trincas. Esse número corresponde a 10,64% de placas com defeitos de trincamento no núcleo.

As trincas observadas estão localizadas na lateral esquerda, na lateral direita ou em ambas as laterais. A localização toma por referência a identificação da placa, conforme figura 48 abaixo.

Figura 48 – Identificação do lado da placa combustível para localização das trincas.

Fonte: Autor.

Com o intuito de verificar a incidência de trincas nos núcleos das placas em função do ajuste entre a cavidade da moldura e o briquete, foram analisadas as quarenta e sete placas nos seus aspectos dimensionais, considerando as larguras da cavidade das molduras e dos briquetes. Na tabela 11 apresenta-se os resultados das folgas e da incidência de trincas no lote de placas piloto.

Das cinco placas com trincas, quatro delas, ou 80%, foram montadas com ajuste de folga entre a cavidade e o briquete e uma foi montada com ajuste de interferência.

As folgas no sentido da largura variaram entre 0,03 mm a 0,28 mm e no sentido do comprimento as folgas variaram de 0,03 mm a 0,23 mm.

As interferências no sentido largura variaram entre -0,04 mm a -0,12 mm e no sentido do comprimento variaram de -0,13 mm a -0,22 mm.

Nesse lote piloto foi verificado uma interferência máxima de 0,22 mm e uma folga máxima de 0,28 mm.

Tabela 11 – Apresentação dos dados das placas de combustível que apresentaram trincas – número da placa, tipo de ajuste e a incidência de trincas.

Número	Ajuste entre Cavidade e Briquete	Incidência de Trinca?
	Folga na LARGURA	
	Tipo de Ajuste	SIM / NÃO
243	INTERFERÊNCIA	NÃO
244	INTERFERÊNCIA	NÃO
245	INTERFERÊNCIA	NÃO
246	INTERFERÊNCIA	NÃO
247	INTERFERÊNCIA	NÃO
248	INTERFERÊNCIA	NÃO
249	INTERFERÊNCIA	NÃO
250	INTERFERÊNCIA	SIM
251	FOLGA	NÃO
252	FOLGA	NÃO
253	FOLGA	NÃO
254	FOLGA	SIM
255	FOLGA	SIM
256	FOLGA	NÃO
257	FOLGA	NÃO
258	FOLGA	NÃO
259	FOLGA	NÃO
260	FOLGA	NÃO
271	FOLGA	NÃO
272	FOLGA	NÃO
273	FOLGA	NÃO
274	FOLGA	NÃO
275	FOLGA	NÃO
276	FOLGA	NÃO
277	FOLGA	NÃO
278	FOLGA	NÃO
279	FOLGA	NÃO
280	FOLGA	NÃO
301	FOLGA	SIM
302	FOLGA	NÃO
303	INTERFERÊNCIA	NÃO
304	FOLGA	NÃO
305	FOLGA	SIM
306	FOLGA	NÃO
307	FOLGA	NÃO
308	FOLGA	NÃO
309	INTERFERÊNCIA	NÃO
310	INTERFERÊNCIA	NÃO
318	INTERFERÊNCIA	NÃO
323	FOLGA	NÃO
324	FOLGA	NÃO
325	FOLGA	NÃO
326	FOLGA	NÃO
327	INTERFERÊNCIA	NÃO
328	INTERFERÊNCIA	NÃO
329	INTERFERÊNCIA	NÃO
330	INTERFERÊNCIA	NÃO

Fonte: Autor.

Nas figuras 49, 50, 51, 52 e 53 são apresentadas as radiografias das placas do lote piloto que apresentaram trincas após a laminação.

Figura 49 – Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca.

Fonte: Autor.

Na montagem da placa 250 foi realizado o aquecimento da moldura e o ajuste real entre a moldura e o briquete foi de: interferência de 0,04 mm.

Figura 50 – Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca em partes específicas.

Fonte: Autor.

Na montagem da placa 254 foi realizado o aquecimento da moldura e o ajuste real entre a moldura e o briquete foi de: folga de 0,28 mm.

Figura 51 – Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca em partes específicas.

Fonte: Autor.

Na montagem da placa 255 foi realizado o aquecimento da moldura e o ajuste real entre a moldura e o briquete foi de: folga de 0,14 mm.

Figura 52 – Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca em partes específicas.

Fonte: Autor.

Na montagem da placa 301 foi realizado o aquecimento da moldura e o ajuste real entre a moldura e o briquete foi de: folga de 0,28 mm.

Figura 53 – Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca em partes específicas.

Fonte: Autor.

Na montagem da placa 305 foi realizado o aquecimento da moldura e o ajuste real entre a moldura e o briquete foi de: folga de 0,16 mm.

Esses resultados indicaram que as trincas observadas nas placas do lote piloto não são relacionadas com a folga entre o briquete e a moldura, pois ocorreram tanto no caso de montagem com folga e com interferência.

6.2 Caracterização dimensional dos briquetes utilizados nos lotes com folga variável e folga padronizada.

Os briquetes utilizados neste trabalho para a elaboração dos lotes de placas com folga variável e folga padronizada foram produzidos utilizando a nova prensa e um novo ferramental (matriz e punções), que atende a especificação do reator RMB. O processo de produção utilizado é similar ao tradicional adotado pelo Centro do Combustível Nuclear - CECON do IPEN, já descrito anteriormente neste trabalho.

O processo de produção dos briquete está bem caracterizado e apresenta boa estabilidade dimensional nas dimensões de comprimento, largura e espessura, bem como suas tolerâncias.

Na tabela 12 apresenta-se a identificação dos briquetes, as dimensões dos comprimentos máximo e mínimo e as dimensões das larguras mínimas e máximas dos briquetes utilizados na elaboração dos lotes com folga variável e folga padronizada.

Considerando a tabela 12, observa-se que a maior dimensão no sentido do comprimento é de 89,75 mm e a menor dimensão é de 89,66 mm, portanto há uma variação dimensional de 0,09 mm. No sentido da largura, a maior dimensão é de 62,64 mm e a menor é de 62,60 mm, portanto há uma variação dimensional no sentido da largura de 0,04 mm.

Para especificação do dimensional do briquete foi adotada a medida de 89,70 +0,05 e - 0,07 para o comprimento e 62,60 + 0,10 e - 0 para a largura.

Os principais critérios utilizados para a adoção das tolerâncias foram: facilidade para obtenção de molduras dentro das tolerâncias estabelecidas (quanto maior o campo de tolerância mais fácil é de se manter a dimensão das molduras dentro do especificado) e consequentemente, menor custo de produção.

A tabela 13 apresenta as dimensões nominais, os afastamentos superiores e inferiores, as tolerâncias e as dimensões máximas e mínimas dos briquetes nas dimensões do comprimento e da largura.

Tabela 12 - Características dimensionais dos briquetes utilizados na elaboração dos lotes com folga variada e folga padronizada.

BRIQUETES				
Número	COMPRIMENTO (mm)		LARGURA (mm)	
	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima
001/19	89,70	89,66	62,63	62,60
002/19	89,73	89,70	62,63	62,62
003/19	89,74	89,73	62,64	62,61
004/19	89,73	89,72	62,63	62,60
005/19	89,72	89,70	62,62	62,60
006/19	89,70	89,69	62,62	62,61
007/19	89,71	89,68	62,62	62,61
008/19	89,73	89,69	62,63	62,60
009/19	89,74	89,69	62,63	62,61
010/19	89,74	89,69	62,63	62,60
011/19	89,73	89,70	62,62	62,60
012/19	89,74	89,74	62,64	62,62
013/19	89,73	89,72	62,63	62,61
014/19	89,75	89,74	62,62	62,60
015/19	89,72	89,70	62,63	62,60
016/19	89,74	89,74	62,63	62,61
017/19	89,72	89,70	62,63	62,60
018/19	89,74	89,70	62,63	62,62
020/19	89,73	89,73	62,62	62,60
021/19	89,72	89,69	62,62	62,60
022/19	89,72	89,70	62,62	62,61
023/19	89,74	89,73	62,62	62,61
024/19	89,72	89,69	62,63	62,60
025/19	89,74	89,72	62,63	62,62
026/19	89,72	89,72	62,62	62,61
029/19	89,72	89,70	62,62	62,61
031/19	89,72	89,70	62,62	62,61
032/19	89,72	89,70	62,63	62,61
034/19	89,72	89,70	62,62	62,60
039/19	89,72	89,70	62,62	62,60
048/19	89,71	89,69	62,62	62,61
050/19	89,71	89,70	62,61	62,60
052/19	89,70	89,69	62,61	62,60
055/19	89,70	89,70	62,62	62,60
056/19	89,72	89,71	62,62	62,60
057/19	89,71	89,70	62,62	62,60
058/19	89,71	89,70	62,62	62,61
059/19	89,71	89,70	62,62	62,60

Fonte: Autor.

Tabela 13 - Dimensões e tolerâncias especificadas para os briquetes.

BRIQUETE						
Dimensão nominal (mm)		Afastamento superior (mm)	Afastamento inferior (mm)	Tolerância (mm)	Dimensão máxima (mm)	Dimensão mínima (mm)
Comprimento	89,70	+ 0,05	- 0,07	0,12	89,75	89,63
Largura	62,60	+ 0,10	- 0,00	0,10	62,70	62,60

Fonte: Autor.

Na figura 54 é apresentado o desenho com as dimensões especificadas para os briquete.

Figura 54 - Desenho do briquete com as dimensões nominais e respectivos afastamentos especificados.

Fonte: Autor.

6.3 Análise da incidência de trincas nas placas combustíveis com folga variável

As molduras com folgas variadas foram produzidas nas dependências do SENAI – SP conforme metodologia apresentada anteriormente.

As folgas nominais aplicadas nas cavidades das molduras foram de: 1,00 mm; 0,80 mm; 0,60 mm; 0,40 mm; 0,20 mm e 0,10 mm. Três conjuntos foram montados para cada nível de folga. Na tabela 14 apresentam-se as dimensões planejadas para a cavidade das molduras e as medidas reais obtidas após a usinagem das molduras.

Tabela 14 – Dimensões da cavidade das molduras conforme as folgas planejadas e dimensões reais obtidas.

FOLGAS	Dimensões planejadas das cavidades das molduras	Dimensões reais das cavidades das molduras (mm)		
		Molduras	compr.	largura
Folga de 1,00 mm	90,65 x 63,60	1	90,64	63,64
		2	90,63	63,62
		3	90,65	63,63
Folga de 0,80 mm	90,45 x 63,40	4	90,47	63,41
		5	90,46	63,42
		6	90,44	63,42
Folga de 0,60 mm	90,25 x 63,20	7	90,25	63,25
		8	90,24	63,23
		9	90,24	63,24
Folga de 0,40 mm	90,05 x 63,00	10	90,04	63,03
		11	90,05	63,02
		12	90,04	63,05
Folga de 0,20 mm	89,85 x 62,80	13	89,85	62,85
		14	89,82	62,8
		15	89,83	62,79
Folga de 0,10 mm	89,75 x 62,70	16	89,73	62,72
		17	89,7	62,68
		18	89,71	62,73

Fonte: Autor.

Nessa etapa os briquetes foram selecionados de modo a obter-se os seis níveis de folga investigados o mais próximo possível da folga nominal planejada. Na tabela 15 é apresentado o conjunto briquete e moldura selecionados.

Tabela 15 – Esquema de seleção de molduras e briquetes para obtenção das folgas reais, no sentido da largura, mais próximas das folgas planejadas.

Folgas planejadas	Molduras		Briquetes		Folgas reais
	Número	Largura	Número	Largura	
1,00 mm	1	63,64	006/19	62,61	1,03
	2	63,62	003/19	62,61	1,01
	3	63,63	007/19	62,61	1,02
0,80 mm	4	63,41	029/19	62,61	0,80
	5	63,42	031/19	62,61	0,81
	6	63,42	009/19	62,61	0,81
0,60 mm	7	63,25	012/19	62,62	0,63
	8	63,23	022/19	62,61	0,62
	9	63,24	002/19	62,62	0,62
0,40 mm	10	63,03	023/19	62,61	0,42
	11	63,02	026/19	62,61	0,41
	12	63,05	018/19	62,62	0,43
0,20 mm	13	62,85	025/19	62,62	0,23
	14	62,80	004/19	62,6	0,20
	15	62,79	005/19	62,6	0,19
0,10 mm	16	62,72	032/19	62,61	0,11
	17	62,68	001/19	62,60	0,08
	18	62,73	013/19	62,61	0,12

Fonte: Autor.

Os conjuntos foram montados, soldados, identificados e laminados a quente e a frio conforme programa de passes apresentado na metodologia.

As placas foram aplainadas, pré cortadas e radiografadas para verificação da integridade do núcleo. Na tabela 16 apresenta-se as folgas produzidas e incidência de trincas nas placas.

Tabela 16 - Folgas reais produzidas e incidência de trincas nas placas.

Folgas planejadas	PLACAS	Folgas reais	Incidência de trincas?
1,00 mm	006/19	1,03	SIM
	003/19	1,01	SIM
	007/19	1,02	SIM
0,80 mm	012/19	0,80	NÃO
	022/19	0,81	SIM
	002/19	0,81	SIM
0,60 mm	029/19	0,63	NÃO
	031/19	0,62	NÃO
	009/19	0,62	SIM
0,40 mm	023/19	0,42	NÃO
	026/19	0,41	NÃO
	018/19	0,43	NÃO
0,20 mm	025/19	0,23	NÃO
	004/19	0,20	SIM
	005/19	0,19	SIM
0,10 mm	032/19	0,11	NÃO
	001/19	0,08	SIM
	013/19	0,12	NÃO

Fonte: Autor.

Como pode ser observado na tabela, as trincas ocorreram nas folgas de 0,10 mm, 0,20 mm, 0,60 mm, 080 mm e 1,00 mm. Porém, nas radiografias pode ser observado que o tipo de trinca é diferente. Nas placas com folgas de até 0,60 mm, as trincas são pontuais em partes da fronteira entre o briquete e a moldura. Já nas folgas acima de 0,60 mm as trincas aparecem em praticamente toda a fronteira e se prolongam em direção ao interior do núcleo da placa combustível. Isso pode ser constatado nas figuras a seguir.

Nas figuras de 55, 57, 58, 59, 60 e 61 apresenta-se as imagens das radiografias de defeito de cada uma das 18 placas produzidas para as folgas de 0,10 mm a 1,00 mm. O exame do núcleo da placa combustível identificou em algumas das placas a presença de trincas, estando alguns desses pontos circundados para facilitar a identificação.

Nas folgas de 1,00 mm ficam evidentes as trincas causadas pela folga entre o briquete e a moldura, como ilustra a figura 55. As trincas se prolongam por praticamente todo o contorno lateral do núcleo da placa combustível, na fronteira entre

a moldura e o briquete. Como existe um espaço (folga) entre as peças, possivelmente a borda do briquete trinca no primeiro passe de laminação. Devido à natureza frágil do briquete e por não existir a moldura para conter o alargamento do briquete, as bordas trincam e o espaço nas trincas são preenchidos pelo alumínio no processo subsequente de laminação.

Figura 55 – Imagens das radiografias das placas com folga de 1,00 mm.

Fonte: Autor.

M. Durazzo et al. (2017) realizaram ensaios metalográficos em seções longitudinais de amostras de placas combustíveis que apresentaram trincamento do núcleo. Seus resultados demonstraram que uma vez ocorrido o trincamento do briquete, durante a laminação subsequente o alumínio do revestimento ocupa os espaços deixados pela fresta. Na figura 56 apresenta-se uma metalografia de uma secção da placa combustível onde apareceram trincas na radiografia. Nota-se que a espessura do núcleo foi reduzida de maneira extrema nesses locais, apresentando vazios e praticamente a inexistência de material físsil. Portanto, as trincas são originadas nos espaços vazios originados por trincas no briquete, os quais são posteriormente preenchidos pelo revestimento de alumínio na laminação, resultando na ausência do material físsil.

Figura 56– Imagens de metalografia de secção de placas combustíveis com diminuição acentuada de espessura por falta de material físsil.

Diminuição acentuada da espessura na ausência de material físsil

Fonte: Adaptada de M. Durazzo et al. (2017)

Observou-se que nas folgas de 0,80 mm as trincas também ocorrem, similares às trincas observadas nas placas combustíveis fabricadas com folga de 1,00 mm. Como ilustra a figura 57, nota-se que na placa 12 não há a ocorrência de trinca causada pela folga, o que indica que a folga máxima admitida pelo processo está próxima a esse nível de folga.

Figura 57 – Imagens das radiografias das placas com folga de 0,80 mm.

Fonte: Autor.

Como ilustra a figura 58, nas folgas de 0,60 mm as trincas ocorreram apenas na placa número 09, e em menor grau. Nessa placa, as trincas no núcleo mostraram-se mais sutis e amenas.

Figura 58 – Imagens das radiografias das placas com folga de 0,60 mm.

Fonte: Autor.

Nas folgas de 0,40 mm não foram observadas trincas, como ilustra a figura 59.

Figura 59 – Imagens das radiografias das placas com folga de 0,40 mm.

Fonte: Autor.

Nas folgas de 0,20 mm foram observadas trincas nas placas 04 e 05. Porém, a aparência desse defeito tem aspectos diferentes das trincas observadas para a folgas maiores. São em menor número com características menos agudas, aparecendo como manchas mais pontuais. Isso está ilustrado na figura 60.

Figura 60 – Imagens das radiografias das placas com folga de 0,20 mm.

Fonte: Autor.

Nas placas combustíveis fabricadas com folga de 0,10 mm, a placa número 01 foi descartada pois ocorreu falha na montagem do briquete na moldura, a qual durante o resfriamento prendeu o briquete fora de posição. Nas outras duas placas combustíveis, números 13 e 32, não foram observadas trincas. A figura 61 apresenta a radiografia dessas placas.

Figura 61 – Imagens das radiografias das placas com folga de 0,10 mm.

Fonte: Autor.

6.4 Análise da incidência de trincas nas placas combustíveis com folga padronizada

Com base na etapa anterior foi definida uma folga entre briquete e cavidade da moldura máxima de 0,45 mm, para evitar trincamento do núcleo, e mínima 0,10 mm, para garantir a montagem sem interferência. Foi estabelecido os dimensionais da cavidade das molduras com as seguintes dimensões:

Comprimento: 89,70 mm - afastamento superior de 0,35 mm e afastamento inferior de 0,15 mm.

Largura: 62,60 - afastamento superior de 0,45 mm e afastamento inferior de 0,20 mm.

Conforme apresentado na tabela 17 e na figura 62.

Tabela 17 - Dimensões nominais e tolerâncias para as molduras para obtenção da folga padronizada.

MOLDURA						
Dimensão nominal (mm)		Afastamento superior (mm)	Afastamento inferior (mm)	Tolerâncias (mm)	Dimensão máxima (mm)	Dimensão mínima (mm)
Comprimento	89,70	+ 0,35	+ 0,15	0,20	90,05	89,85
Largura	62,60	+ 0,45	+ 0,20	0,25	63,05	62,80

Fonte: Autor.

Figura 62 - Desenho da cavidade da moldura com as dimensões nominais e respectivas tolerâncias.

Fonte: Autor.

A folga mínima utilizada para a largura, que é a dimensão importante para este trabalho, foi de 0,10 mm (considerada uma folga adequada para garantir a montagem da moldura com o briquete sem a necessidade de aquecimento), e a máxima foi de 0,45 mm (considerada a folga máxima para garantir que não ocorra o trincamento do núcleo). Essas tolerâncias também são facilmente alcançadas nas usinagens utilizando máquinas com Comando Numérico Computadorizado – CNC, que é o caso Centro de Combustível Nuclear do IPEN.

Tabela 18 - Folgas máxima reais entre as molduras e briquetes das placas elaboradas com folga padronizada.

MOLDURAS	BRIQUETES	Ajuste entre cavidade e briquete		Trinca por folga?
		Folga na LARGURA		SIM / NÃO
		Máxima	Tipo de Ajuste	
22	008/19	0,24	FOLGA	Não
19	010/19	0,27	FOLGA	Não
20	011/19	0,31	FOLGA	Não
31	014/19	0,32	FOLGA	Não
21	015/19	0,22	FOLGA	Não
32	016/19	0,29	FOLGA	Não
33	017/19	0,23	FOLGA	Não
34	020/19	0,27	FOLGA	Não
30	021/19	0,29	FOLGA	Não
29	024/19	0,29	FOLGA	Não
28	034/19	0,29	FOLGA	Não
35	039/19	0,28	FOLGA	Não
36	048/19	0,31	FOLGA	Não
27	050/19	0,26	FOLGA	Não
26	052/19	0,37	FOLGA	Não
24	055/19	0,25	FOLGA	Não
37	056/19	0,29	FOLGA	Não
23	057/19	0,26	FOLGA	Não
25	058/19	0,24	FOLGA	Não
38	059/19	0,30	FOLGA	Não

Fonte: Autor.

A padronização das dimensões dos briquetes e das molduras, bem como de suas tolerâncias garantiram que qualquer uma das peças produzidas, dentro das tolerâncias especificadas, montarão sem a necessidade de aquecimento e com a folga máxima de 0,45 mm na dimensão da largura. Essa situação será a rotina de produção de placas combustíveis. Vinte placas foram produzidas nessas condições procurando-se validar essas especificações dimensionais.

Para essa etapa os briquetes foram separados aleatoriamente e as folgas reais estão apresentadas na tabela 18. Nessa tabela também se resume o resultado da inspeção radiográfica para verificação de trincamento do núcleo.

Nas figuras 63, 64, 65 e 66 apresenta-se as radiografias das placas com folga padronizada entre 0,10 mm e 0,45 mm.

Observou-se que do total de vinte placas combustíveis fabricadas utilizando-se a folga padronizada, onze placas apresentaram trincas, ainda que incipientes. Contudo, tais trincas não parecem ter sido causadas pela folga entre o briquete e a cavidade da moldura, apresentada na figura 29. A aparência desse defeito parece ser diferente das trincas observadas para a folgas maiores. São em menor número com características menos agudas, aparecendo como manchas mais pontuais, como observou-se na figura 60, referente à folga de 0,20 mm. Na análise do lote piloto de quarenta e sete placas também foi constatado esse outro tipo de defeito, não propriamente um trincamento, mas sim uma heterogeneidade que poderia ser descrita como uma “trinca incipiente”.

Figura 63 – Imagens das radiografias das placas 08, 10, 11, 14 e 15 com folga padronizada.

Fonte: Autor.

Figura 64 – Imagens das radiografias das placas 16, 17, 20, 21 e 24 com folga padronizada.

Fonte: Autor.

Figura 65 – Imagens das radiografias das placas 34, 39, 48, 50 e 52 com folga padronizada.

Fonte: Autor.

Figura 66 – Imagens das radiografias das placas 55, 56, 57, 58 e 59 com folga padronizada.

Fonte: Autor.

6.5 Análise da incidência de trincas incipiente nas placas combustíveis

Uma vez que os resultados experimentais indicaram que os defeitos observados no lote piloto para qualificação do novo equipamento e ferramenta de compactação, assim como nos lotes de folgas variadas e folga padronizada, não são causados pela folga entre o briquete e a cavidade da moldura, realizou-se um estudo adicional em busca de possíveis causas para esse tipo de defeito.

Observou-se experimentalmente que a ocorrência das trincas em muitas das placas combustíveis produzidas e analisadas são diferentes das caracterizadas como trinca por folga entre o briquete e a moldura, pois se caracterizam por serem em menor quantidade, em regiões pontuais e, em geral, em forma circulares, aparecendo como pontos brancos na fronteira do núcleo da placa combustível.

Na figura 67 apresenta-se as radiografias de duas placas combustíveis indicando as principais diferenças entre as trincas causadas pelo excesso de folga entre o briquete e a cavidade da moldura e os outros defeitos observados, de origem desconhecida.

Figura 67 – Imagem de radiografia de duas placas com trincas características causadas por excesso de folga e outras trincas observadas.

Esse outro tipo de trinca observado independe da folga, pois ocorreu na placa 250 em que o ajuste entre o briquete e moldura foi de interferência de 0,04 mm, conforme pode ser observado na figura 68.

Figura 68 – Radiografia da placa apresentando o defeito de trinca.

Fonte: Autor.

Suspeitou-se que esse tipo de defeito tenha sido causado por defeitos existentes nos briquetes, como cantos quebrados, lascas ou porosidade (falta de material) nas laterais dos briquetes. Por esse motivo, alguns dos briquetes foram analisados visualmente. Nas figuras 69, 70 e 71 apresenta-se fotos dos briquetes 52, 50 e 58 e respectivos detalhes.

Figura 69 – Foto do briquete 52 e detalhe de um dos cantos com pequenas lascas.

Fonte: Autor.

Figura 70 – Foto do briquete 50 e detalhe de cantos com pequenas lascas e lateral com ranhuras e falta de material.

Fonte: Autor.

Figura 71 – Foto do briquete 58 e detalhe de cantos com pequenas lascas e lateral com ranhuras e falta de material.

Fonte: Autor.

Além das fotos e observações visuais, no briquete 42 foram realizadas inspeções utilizando um microscópio eletrônico de varredura – MEV, a fim de se observar detalhes desses defeitos nas bordas do briquete. Na figura 72 apresenta-se fotos desse briquete e nas figuras 73, 74 e 75 apresenta-se as imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura – MEV da região lateral do briquete.

Figura 72– Foto do briquete 42 com detalhe da região lateral e cantos.

Fonte: Autor.

Figura 73 – Imagem da região lateral do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV.

Fonte: Autor.

Figura 74 – Imagem da região lateral do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV.

Fonte: Autor.

Figura 75 – Imagem da região lateral do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV.

Fonte: Autor.

Nas imagens apresentadas nas figuras 73, 74 e 75 as regiões mais escuras representam regiões com ausência de material fóssil.

Nas figuras 76, 77 e 78 apresenta-se as imagens produzidas em microscópio eletrônico de varredura – MEV da região dos cantos do briquete 42.

Figura 76 – Imagem do canto do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV.

Fonte: Autor.

Figura 77 – Imagem do canto do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura MEV.

Fonte: Autor.

Figura 78 – Imagem do canto do briquete 42 realizada em microscópio eletrônico de varredura – MEV.

Fonte: Autor.

Nessas imagens observam-se regiões com ausência de material físsil. Tais regiões são potencialmente propensas a produzir defeitos na laminação similares aos causados por trincamento do núcleo, visto que também são vazios que serão ocupadas pelo alumínio do revestimento na laminação subsequente.

Os cantos quebrados nos briquetes provavelmente foram causados pela falha no polimento da matriz de compactação. O polimento inadequado da matriz também pode ser o causador do arranque do material nas laterais dos briquetes.

7 CONCLUSÕES

Essa pesquisa contribui com um arcabouço de informações, principalmente relacionadas as questões dimensionais da cavidade da moldura e o tipo de ajuste na montagem do conjunto moldura, tornando-o conhecido, bem caracterizados e conhecida a influência no aparecimento de trincas no núcleo.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que as folgas padronizadas para as dimensões da cavidade da moldura produzirão placas íntegras, sem a ocorrência de trincas por excesso de folga e sem necessidade de aquecimento da moldura para a montagem.

O dimensional para produção de uma faixa de folgas adequada foi estabelecido nesse trabalho e é apresentado abaixo

Dimensional para os briquetes

Comprimento 89,70 $\begin{matrix} + 0,05 \\ - 0,07 \end{matrix}$

Largura 62,60 $\begin{matrix} + 0,10 \\ - 0 \end{matrix}$

Dimensional para as molduras

Comprimento 89,70 $\begin{matrix} + 0,35 \\ + 0,15 \end{matrix}$

Largura 62,60 $\begin{matrix} + 0,45 \\ + 0,20 \end{matrix}$

A folga mínima recomendada para garantir a montagem da moldura com o briquete sem a necessidade de aquecimento é de 0,10 mm e a máxima é de 0,45 mm, que conforme apresentada como resultado deste trabalho, não ocasionou o trincamento do núcleo.

Também é oportuno ressaltar que as tolerâncias especificadas são obtidas com facilidade nas usinagens utilizando máquinas com Comando Numérico Computadorizado – CNC.

O processo de produção dos briquetes apresenta boa estabilidade dimensional nas dimensões de comprimento, largura e espessura. Porém, o novo ferramental de compactação (matriz e punções) não está adequado para a produção de briquetes, que apresentam cantos quebrados, sulcos e vazios em todas as arestas. Essas anomalias causam defeitos nas extremidades do núcleo após a laminação.

Para garantia das dimensões especificadas para a cavidade da moldura é necessário um controle dimensional rígido, garantindo-se que as molduras e os briquetes que não atenderem à especificação sejam refugadas ou retrabalhadas.

A operação de dilatação da moldura por aquecimento para o encaixe do briquete no atual ajuste com interferência poderá ser eliminado. Portanto, as perdas por contração da moldura antes do encaixe perfeito do briquete serão evitadas.

Dos resultados conclui-se que o ferramental de compactação dos briquetes seja readequado ou substituído, garantindo-se nas paredes da cavidade da matriz e nos punções uma rugosidade máxima de RA 0,39 ou RZ 3,40 e acabamento polido espelhado.

Após essa readequação no ferramental, novos briquetes precisarão ser produzidos e a qualidade deverá ser avaliada. Os principais critérios a serem observados deverão ser: os cantos – se apresentam lascas, a superfície lateral – se apresenta ranhuras e arrancamento de material e se na superfície próximas as laterais se há presença de trincas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Alumínio e suas Ligas: Classificação: NBR 6834. Rio de Janeiro, 1981.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. (1977). "Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões". Edgard Blucher, 295p.

AIEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Standardization of Specifications and Inspection Procedures for LEU Plate-type research reactor fuels. Vienna: IAEA, 1988. (IAEA-TECDOC-467).

ANL - ARGONNE 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: 28 julho 2019.

BJORKE, O. Computer Aided Tolerancing: Tapir Publishers, 1978.

BRALLA, J. C. Handbook of Product Design for Manufacturing - A Practical Guide to Low Cost Production: McGraw-Hill, 1986.

CNEN. Divisão de fabricação e projeto. Documento Restrito, CNEN, Brasil, 2012.

CNEN. Reator Multipropósito Brasileiro- Escopo preliminar do projeto-relatório técnico, CNEN, Brasil, 2008. Disponível em: <http://rmb.ipen.br/DOC_RMB/MARCO/INICIO/Escopo_Preliminar/Relatorios/RelatorioTecnico.pdf> Acesso em 16 nov. 2018.

COPELAND, G.L., HOBBS, R.W., HOFFMAN, G.L., SNELGROVE, J.L. Performance of Low-Enriched U₃Si₂-Al Dispersion Fuel Elements in the Oak Ridge Research Reactor., Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, October, ANL/RERTR/TM-10, 1987.

CUNNINGHAM, J. E.; BOYLE, E. J. MTR-Type fuel elements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PEACEFUL USES ATOMIC ENERGY, Aug. 8-20, 1955, Geneva. v.9. Reactor technology and chemical processing. Geneva: United Nations, 1956. Proceedings... p. 203-7.

CUNNINGHAM, J. E.; BOYLE, E. J. MTR-Type fuel elements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PEACEFUL USES ATOMIC ENERGY. [ed.] United Nations. 1955, Vol.9, pp.203-207.

CUNNINGHAM, J.E.; BEAVER, R.J.; THURBER, W.C.; WAUGH, R.C. Fuel dispersions in aluminum-base elements for research reactors. In: USAEC. FUEL ELEMENTS, Conference held in Paris, November 18-23, 1957. Oak Ridge, Tn: Oak Ridge: USAEC, 1958, p.269-297, (TID-7546). Disponível em: <<http://dels.nas.edu/resources/staticassets/nrsb/miscellaneous/ProjectLemoine.pdf>> Acesso em: jun. 2019.

DOMAGALA, R.F., WIENCEK, T.C., THRESH, H.R., STAHL, D., The status of uranium-silicide alloy fuel development for the RERTR Program. 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.

DURAZZO, M. Estudo da porosidade residual em núcleos de placas combustíveis a base de dispersões U_3O_8 -Al. Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento, v. 7, p. 317-331, 2005.

DURAZZO, M.; RIELLA, H. G. Procedures for Manufacturing Nuclear Research Reactor Fuel Elements. LAP - Lamberts Academic Publishing, 2015.

DURAZZO, M.; SOUZA, J.A.B.; URANO de CARVALHO, E.F.; RIELLA, H. G. Effect of porosity on the manufacturing of U_3O_8 -Al dispersion fuel plates. Progress in Nuclear Energy 99, 49-58 (2017). Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197017301063>>. Acesso em: 24 dez. 2019.

FERRUFINO, F. Determinação Quantitativa da Homogeneidade da Distribuição de Urânio em Combustíveis Nucleares Tipo Placa. 2011. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

GGN JORNAL. Disponível em: <<https://jornalgggn.com.br/noticia/reator-multiproposito-brasileiro/>> Acesso em 24 abr. 2019.

GRABER, M. J.; ZUKOR, M.; GIBSON, G. W. Superior irradiation performance of stainless steel cermet fuels plates through use of low-density UO_2 . Transactions American Nuclear Society. v. 10, p. 482-483, 1967.

HOFMAN, G. L., MEYER, M. K., RAY, A. Design of High Density GammaPhase Uranium Alloys for LEU Dispersion Fuel Applications. International RERTR Meeting, São Paulo, 18-23, October, 1998.

HOLDEN A.N. Dispersions fuel elements. New York, Gordon & Breach, 1967.

HROVAT, M.F.; HASSEL, H.W.; WEHNER, E.L. “Advanced MTR fuel” Nuclear Europe, 6,28-30, 1985.

IPEN – Instituto de Pesquisas Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=2773&campo=7893> Acesso em 24 abr. 2019.

ISO 286-1:1988- ISO systems of limits and ts - Part 1- bases of tolerances, deviations and ts.

JÚNIOR, R.B. Desenvolvimento de método de medição das espessuras de núcleos e revestimentos de placas combustíveis. 2013. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

KAUFMAN, A. R. "Nuclear Reactor Fuel Elements, Metallurgy and Fabrication". New York, Interscience, 1962.

LEACH R. (2001). "The measurement of surface texture using stylus instruments". Measurement good practice guide no. 37 national physical laboratory Teddington, middlesex, United Kingdom, 97p.

LEMOINE, P. "Fuel design and LEU development for the Jules Horowitz Reactor". In: NAS-RAS SYMPOSIUM ON THE CONVERSION OF RR TO LEU FUEL, June 8-10, 2011, Moscow, Russian Federation. Multipropósito Brasileiro, v. 1, Documento técnico, 2013.

MARTIN, M. M.; RICHT, A. E. Effect of void volume on irradiation performance of aluminum-base dispersion-type fuel plates. Transactions of the American Nuclear Society. v. 12, n.1, p. 98-99, 1969.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Relatório de Gestão do Exercício de 2017. Rio de Janeiro, 2018. MRS Estudos Ambientais Ltda. Estudo de impacto ambiental do Reator.

NAZARE, S., Low Enrichment Dispersion Fuels for Research and Test Reactors. Journal of Nuclear Materials, v. 124, p. 14-24, 1984.

NBR 6158 - Sistemas de tolerâncias e ajustes. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, 1995.

NOVASKI, O. (1994). "Introdução à engenharia de fabricação mecânica", ed. Edgard Blücher LTDA, 119p., São Paulo, Brasil.

PERROTTA, J. A.; SOARES, S. J. Rmb: The new brazilian multipurpose research reactor. In: 45th Annual Meeting on Nuclear Technology. [S.l.: s.n.], 2015. p. 30–34.

PIRATELLI, F. A. "Rugosidade superficial", Palestra 3º Seminário de metrologia, Brasília, Brasil, 41p. 2011.

PROVENZA, F. P. – PROTEC – Projetista de Máquinas. São Paulo. Escola PROTEC, 4ª Ed. 1996.

SALIBA SILVA, A. M.; DURAZZO, M.; URANO de CARVALHO, E. F.; RIELLA, H. G. Fabrication of U_3Si_2 powder for fuels used in IEA-R1 nuclear research reactor. Materials Science Forum, v. 591-593, p. 194-199, 2008.

SALIBA, A. M. -Silva, URANO de CARVALHO, E. F., RIELLA, H. G. e DURAZZO, M. Research reactor fuel fabrication to produce radioisotopes Radioisotopes – Applications in Physical Sciences, cap.2, 2011, p.21-54.

SIMÕES, A.V. Desempenho sob irradiação de combustíveis a dispersão de MTR. 1993. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

SNELGROVE J.L., DOMAGALA R.F., HOFFMAN, 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. In: SAFETY EVALUATION REPORT RELATED TO THE EVALUATION OF LOW-ENRICHED URANIUM SILICIDE-ALUMINIUM DISPERSION FUEL FOR USE IN NON-POWER REACTOR, United States Nuclear Regulatory Commission, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, October, ANL/RERTR/TM-11, 1987, NUREG-1313 TI 88.

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, October 1987. ANL/RERTR/TM-11.

SOARES, H.A.; Avaliação de segurança do reator multipropósito brasileiro. 2014. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TRAVELLI, A. Current status of the RERTR program. In: DEVELOPMENT FABRICATION AND APPLICATION OF REDUCED-ENRICHED FUELS FOR RESEARCH AND TEST REACTOR, November 12-14, 1980, Vienna, Proceedings held in Argonne III: (CONF-801144).

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: 28 jun. 2019.

TRUCKS, H. E. Designing for Economical Production. 2nd. ed. Michigan: Society of manufacturing Engineers, 1987.

United .States Nuclear Regulatory Commission: Safety evaluation report related to the evaluation of low-enriched uranium silicide-aluminum dispersion Ffuel for use in non-power reactors, Maryland: U. S.NRC, July, 1988, NUREG-1313.

VAN THYNE, R. J.; McPHERSON, D.J. Transformation Kinetics of UraniumMolybdenum Alloys. Trans. Am. Soc. Metals, v. 49, p. 598, 1957.

VIEIRA, E. Estudo Paramétrico da Deformação de Placas Combustíveis com Núcleos de Dispersão U_3Si_2 -Al. 2011. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

XI, S.W.; YONG, X. Mechanical Characterizations of the Dispersion U_3Si_2 -Al Fuel Plate with Sandwich Structure. Applied Composite Materials 10, 159–167 (2003). Springer Link. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1023978413329>>. Acesso em: 24 dez. 2019.

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.

WANG, X.S.; LI, S.S.; WANG, Q.Y.; XU, Y. Effect of the fabrication process on fatigue performance of U_3Si_2 fuel plate with sandwich structure. Journal of Nuclear Materials 342, 42-47 (2005). Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311505001388>>. Acesso em: 24 dez. 2019.

YANKEE, H. W. Manufacturing Processes. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1979.