



22 a 27 de abril de 1990

ANAIIS - PROCEEDINGS

QUALIFICAÇÃO SOB IRRADIAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS TIPO MTR DE U_3O_8 -Al
DE FABRICAÇÃO IPEN/CNEN-SP NO REATOR IEA-R1

José Augusto Perrotta
João Roberto Loureiro de Mattos
Cristina Sayuri Hayashi
Antonio Teixeira e Silva
Humberto Gracher Riella *

Comissão Nacional de Energia Nuclear
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Departamento de Tecnologia de Reatores
Divisão de Engenharia do Núcleo

* Projeto Combustível Nuclear

SUMÁRIO

As especificações do combustível tipo dispersão de U_3O_8 -Al de fabricação IPEN/CNEN-SP para o reator IEA-R1 são apresentadas. O histórico do desenvolvimento destas especificações é acompanhado através de uma descrição da experiência mundial de utilização deste combustível em reatores de pesquisa e teste de materiais e dos exames pós-irradiação em células quentes. Um programa de inspeção tem sido conduzido para qualificação destes combustíveis.

ABSTRACT

The specifications for U_3O_8 cermet fuel, utilized in the Research Reactor IEA-R1, and fabricated by IPEN/CNEN-SP, are presented. The history of the specification development is followed through descriptions of the world experience in research and material test reactor fuel utilization and post-irradiation examination in hotcells. An inspection program has been carried out for fuel qualification.

1. INTRODUÇÃO

O reator IEA-R1 é um reator de pesquisa tipo piscina aberta, que entrou em funcionamento em 1957, e opera hoje a 2 MWt de potência. Seus combustíveis são constituídos de um conjunto de placas planas paralelas, as quais contêm urânio na forma de uma liga metálica ou na forma de dispersões. Já foram realizadas algumas trocas de combustíveis sendo que a maioria dos elementos combustíveis atuais no reator são da terceira carga. Esta carga consistiu de elementos de alto enriquecimento, 93% em peso U235, de uma liga U-Al de fabricação americana. Com a restrição mundial à venda de elementos combustíveis de alto enriquecimento houve a necessidade, internacionalmente, de se pesquisar combustíveis com enriquecimento limitado a 20%. Esta pesquisa mundial se encaminhou na obtenção de combustíveis contendo compostos com alto teor de urânio. Neste sentido foram desenvolvidos combustíveis como os de dispersão de $UAlx-Al$, U_3O_8-Al , U_3Si-Al com revestimento de alumínio e combustíveis contendo plaquetas planas de UO_2 com revestimento plano de Zircaloy. Já na quarta carga do reator IEA-R1 foram colocados 5 elementos combustíveis com 20% de enriquecimento, do tipo de dispersão $UAlx-Al$, de fabricação alemã.

O IPEN/CNEN-SP tem como linha de pesquisa e fabricação combustíveis do tipo dispersão de U_3O_8-Al , possuindo uma especificação bem definida, baseada na experiência adquirida ao longo de vários anos de estudo. Em 1985 foram fabricados dois elementos combustíveis experimentais os quais foram colocados no reator IEA-R1 com o objetivo de verificar o desempenho destes sob irradiação. Estes são geometricamente idênticos aos combustíveis da terceira e quarta carga do reator (americano e alemão), mas apenas com algumas placas combustíveis, sendo as outras placas de alumínio. Como o Brasil não dispõe de células quentes para análise pós-irradiação, o programa de acompanhamento destes combustíveis ficou limitado às observações visuais e testes não destrutivos dentro da piscina do reator IEA-R1, de forma a qualificá-los sob irradiação e suprir as necessidades de troca daqueles combustíveis que estivessem com alta queima. Hoje já existem combustíveis completos de fabricação IPEN/CNEN-SP operando dentro do reator IEA-R1.

Este trabalho apresenta um resumo comparativo das especificações do combustível IPEN/CNEN-SP, com combustíveis semelhantes de fabricantes tradicionais nos aspectos de maior importância em termos de desempenho sob irradiação. É apontada a experiência mundial obtida para estes combustíveis sob irradiação e as características observadas em exames pós-irradiação em células quentes. É também apresentado um resumo de inspeções e dados obtidos com a irradiação dos elementos combustíveis de fabricação IPEN/CNEN-SP no reator IEA-R1.

2. ESPECIFICAÇÃO DO COMBUSTÍVEL

Os elementos combustíveis da terceira carga do reator IEA-R1, do IPEN/CNEN-SP, são de origem americana, fabricados pela United Nuclear

Corporation, tendo enriquecimento de 93,15 % e 10,0g de U-235 por placa combustível. Na quarta carga do reator, foram trocados apenas 5 elementos combustíveis, sendo estes adquiridos da firma alemã NUKEM, tendo enriquecimento de 19,77 % e 10,0g de U-235 por placa combustível. Tanto os elementos combustíveis americanos quanto os alemães são idênticos em forma e geometria, diferindo, no entanto, no tipo de combustível e na espessura do revestimento das placas combustíveis. A placa combustível americana é formada de uma liga U-Al e alto enriquecimento. A placa combustível alemã é formada de uma dispersão $UAlx-Al$, possuindo baixo enriquecimento, necessitando de maior espessura do cerne para ter a mesma quantidade de U-235 que a placa americana. Mantida idêntica, então, a espessura da placa combustível, foi necessário diminuir a espessura do revestimento na placa combustível alemã. O elemento combustível de fabricação IPEN/CNEN-SP, tem a forma e geometria idênticas ao elemento combustível alemão. O enriquecimento é de 19,90 %, e possui 10,0g de U-235 por placa combustível. A diferença básica em relação ao alemão, é que o material da placa combustível é uma dispersão de U_3O_8-Al .

As placas combustíveis são fabricadas pela técnica de metalurgia do pó e laminação. O pó de U_3O_8 é misturado ao pó de alumínio, até se obter uma mistura homogênea, sendo posteriormente compactado numa prensa, formando o que é denominado briquete. Este briquete é então envolvido lateralmente por uma moldura de liga de alumínio. A moldura e o briquete são cobertos em suas faces por placas de liga de alumínio, formando uma espécie de "sanduíche". Este conjunto é então laminado a quente, sendo o último passe de laminação dado a frio, para atingir dimensões e resistência mecânica necessárias à placa. Em consequência deste processo, o que se obtém é uma placa combustível em que o cerne é composto por uma dispersão de U_3O_8-Al , onde o urânio está disperso de forma próxima à homogênea em quantidades determinadas. Seu revestimento é totalmente estanque, já que existe um caldeamento, entre revestimento, moldura e o briquete. As características de cada pó, bem como do revestimento e moldura devem ser compatíveis para um bom caldeamento na laminação, boa configuração geométrica do cerne, boa homogeneidade do cerne, e bom desempenho sob irradiação.

Para se alcançar os objetivos desejados de desempenho num combustível de dispersão os seguintes itens devem ser observados: (a) o tamanho das partículas dispersas (físsil) dever ser grande comparado ao percurso médio de um fragmento de fissão; (b) a distribuição das partículas dispersas na matriz do metal deve ser o mais uniforme possível; (c) a densidade do material da fase dispersa (físsil) deve ser alta; (d) a fase contínua da matriz de metal deve ter o máximo de volume possível na dispersão. As principais características dos pós, briquetes e placas utilizadas no IPEN/CNEN-SP e que são de importância para o desempenho sob irradiação são:

- a) pó de U_3O_8
 - conteúdo de urânio > 84,5 %
 - fração de UO_2 < 1 %
 - conteúdo de impurezas < 1500 $\mu g/gU$

- conteúdo de umidade < 1 %
- concentração isotópica 19,90 + 0,05 % em peso de U235
- boro equivalente < 4 µg/gU
- tamanho de partículas < 74 µm com até 20 % inferior a 44 µm
- massa específica > 8,0 g/cm³

b) pó de alumínio

- material base - alumínio ASTM-1100 (> 99 % Al)
- conteúdo de Al₂O₃ - < 0,7 %
- tamanho das partículas - < 44 µm

c) briquete

- massa específica - 3,9 ± 0,2 g/cm³
- fração de U₃O₈ - 56,6 % em peso

d) revestimento e moldura

- alumínio ASTM 1060

e) placa combustível

- laminação a quente (580 °C)
- teste de empolamento após último passe a quente - não deve existir bolha na região do cerne
- laminação a frio
- tratamento superficial de decapagem
- distribuição de urânio na placa - 26 mg U₂₃₅/cm²
- desvio de homogeneidade - ± 12 % na zona central.
± 25 % na zona periférica

A fração de U₃O₈ utilizada nesta placa é reduzida gerando um combustível com baixa densidade em urânio. Por este fator, pelas características de pós adotadas e pelos processos de fabricação utilizados há certeza de se ter um combustível tipo dispersão com características adequadas para bom desempenho.

3. UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS TIPO DISPERSÃO U₃O₈-AL

O desempenho satisfatório de dispersões do tipo U₃O₈-Al com baixo enriquecimento em urânio foi comprovado no início dos anos sessenta no Laboratório Nacional de Oak Ridge (ORNL) /1/. Estudos de fabricação neste laboratório resultaram no desenvolvimento de uma dispersão 65 % U₃O₈ - 35 % Al em peso, limitada a 20 % de enriquecimento do isótopo U-235. Exames pós-irradiação foram conduzidos em placas miniaturas e em um elemento combustível completo no reator de pesquisa de Oak Ridge (ORR). As placas miniaturas encapsuladas estavam em contacto com a água do reator a 45 °C, atingindo a temperatura máxima de 82,2 °C para um fluxo de calor de 47,3 W/cm². O elemento combustível foi irradiado por seis meses no núcleo do mesmo reator. Os resultados destes estudos revelaram que estas dispersões comportavam-se confiavelmente em reatores de pesquisa a baixas temperaturas de irradiação (e

temperaturas do refrigerante entre 30 e 90 °C). A estabilidade dimensional do sistema combustível era aceitável, mesmo após queimas excedendo $7,7 \times 10^{20}$ fissões/cm (92,5 % de depleção de U-235), como testadas nas placas miniaturas. A estabilidade do elemento combustível era confiável, quando testado a queimas médias de 50 % de depleção de U-235. Reações ocorriam entre o combustível e a matriz de alumínio, mas estas não causavam efeitos adversos à estabilidade dimensional das placas. Exames metalográficos e de difração por raio-X mostravam uma significativa reação entre o U_3O_8 e o alumínio. A extensão da reação parecia ser proporcional a queima e se processava mais rapidamente, quanto menor a partícula de U_3O_8 . Partículas maiores de U_3O_8 pareciam sinterizar a altas densidades a relativamente baixas queimas, resultando na formação de grandes vazios ao redor da partícula combustível. Com a queima prolongada, partículas maiores de combustível mostravam um aumento evidente de porosidade devido aos gases de fissão. Também, a altas queimas, ocorria uma reação completa de partículas pequenas de U_3O_8 com a matriz de alumínio.

Com o desenvolvimento de projeto dos Reatores de Teste Avançados (Advanced Test Reactor - ATR) e dos Reatores Produtores de Radioisótopos (High Flux Isotope Reactor - HFIR) foi reconhecido que o material combustível a ser usado no cerne das placas combustíveis não poderia ser uma liga de urânio-alumínio (U-Al) empregada com sucesso nos Reatores de Testes de Engenharia (Engineering Test Reactor-ETR). Para os reatores de alto fluxo, havia a necessidade de se aumentar o teor de urânio no cerne da placa combustível. Se adotada a solução da liga U-Al, o teor de urânio tinha de ser elevado, da ordem de 45 a 50 %, acarretando problema no que se refere a homogeneidade da composição. Dispersões do tipo $UAlx-Al$ e U_3O_8-Al foram desenvolvidas para utilização nos reatores de alto fluxo, pois permitiam tanto um controle fechado da carga do elemento físsil como uma distribuição tão homogênea quanto possível. As dispersões de U_3O_8-Al tinham sido irradiadas com sucesso no ORNL a uma taxa de $7,7 \times 10^{20}$ fissões/cm³. Era claro, entretanto, que os requisitos operacionais para o ATR e o HFTR superariam as condições anteriores e o comportamento da dispersão em condições mais severas poderia não ser favorável. Dispersões com cerca de 41 % U_3O_8 - 59 % Al em peso, 93,16 % enriquecidas em U-235 foram testadas nas condições de operação dos reatores acima /2/. O pó de U_3O_8 foi fornecido pela planta Y-12 de Oak Ridge. No pó não foi detectado UO_2 e sua densidade era maior que 8,2 g/cm³. O tamanho das partículas variava entre 88 e 44 µm e não continham mais do que 10 % de partículas menores que 44 µm. O conteúdo de urânio mínimo era de 84 % em peso. Liga de alumínio 6061 foi usada para a moldura e o revestimento e impurezas como Cd, Li, Co e B foram limitados. Os resultados dos exames pós-irradiação destas dispersões mostraram que não houve evidências de empoamento ou outro efeito deletério à estabilidade do combustível. Recozimentos pós-irradiação das placas mostravam que a temperatura limite para início do empoamento era de cerca de 399 °C a uma densidade de 15×10^{20} fissões/cm³. Em um estágio particular durante a irradiação, ocorreu separação matriz-partícula em áreas localizadas. Havia, também, evidências de interconexão de partículas. Entretanto, nas condições de irradiação destes testes, não houve uma grande separação matriz-partícula e o empoamento dentro do reator não ocorreu. A

irradiação levou a um aumento na resistência mecânica e a uma perda de ductilidade do material. A exposições intermediárias (6×10^{20} fissões/cm³), as trincas ficavam confinadas à partícula. À exposição de 12×10^{20} fissões/cm³, o endurecimento devido a irradiação não foi considerado importante pelas seguintes razões: 1) as trincas ficavam confinadas às partículas; 2) nem todos os gases de fissão eram liberados para os vazios em volta das partículas; 3) as deflexões nas placas eram mínimas. A taxa de corrosão do alumínio 6061 irradiado era baixa, sendo a mesma medida em experimentos fora do reator.

Com o sucesso da irradiação das dispersões U₃O₈-Al, um considerável trabalho foi desenvolvido na sua tecnologia de fabricação. A caracterização deste combustível era desejável pelo menos por dois propósitos. O primeiro era desenvolver um método para prever o comportamento sob irradiação da placa combustível e o conhecimento da reação desse combustível aos processos de fabricação. O segundo era caracterizar o comportamento de fabricação do combustível de forma que se pudesse conhecer que propriedades especificar, quando da compra do combustível comercial. Leitten, Jr. e Hobson /3/ acreditavam que uma avaliação das propriedades de fragmentação e alinhamento do U₃O₈ disperso em alumínio, baseada em critérios, tais como, densidade do óxido, área superficial e procedimentos de fabricação podiam fornecer dados que, quando combinados com resultados de testes de irradiação, garantiriam uma base firme para prever o comportamento sob irradiação. Um grau elevado de alinhamento das partículas de óxido fragmentadas seria prejudicial ao elemento combustível em consequência de : 1) aumento de superfície específica do óxido, ocasionando maior reatividade do mesmo; 2) textura fribosa da dispersão laminada, resultando uma direcionalidade de propriedades mecânicas; 3) segregação da fase cerâmica, ocasionando heterogeneidade na distribuição da fase físsil. A conclusão destes estudos levou a que a fabricação de elementos combustíveis com cerne de U₃O₈-Al fosse agrupada em variáveis que influenciavam o produto final. Estas variáveis foram classificadas em variáveis de materiais, de processamento das dispersões, da moldura e do revestimento e do processo de conformação e caldeamento por laminação /4/. Os pesquisadores de Oak Ridge concentraram-se nas variáveis da fase cerâmica: densidade, morfologia, superfície específica e granulometria. Os estudos desenvolvidos mostraram que a densidade da partícula poderia ser, a priori, uma indicação direta de sua resistência a fragmentação. A influência da morfologia sobre a resistência a fragmentação podia ser analisada sob o seguinte aspecto: quanto maior a angulosidade do grão cerâmico, maior a probabilidade de ocorrer fraturas durante a deformação mecânica. Irregularidades no grão que afastam de sua forma esférica dão origem a porosidades interconectadas, que tendem a diminuir a resistência da partícula e, conseqüentemente, o produto final apresentará um grande número de partículas fragmentadas. A terceira variável, superfície específica, está indiretamente correlacionada com as duas acima, tornando-se um dado mensurável do grau de fragmentação. Com respeito a granulometria, foi verificado que a estabilidade sob irradiação apresentada pela dispersão U₃O₈-Al decorria, principalmente, do fato de que os produtos de fissão se acumulavam no interior

ou nas vizinhanças das partículas combustíveis. Sendo assim, o tamanho e a distribuição geométrica das partículas se tornavam duas características importantes para garantir uma boa estabilidade sob irradiação. A distância entre as partículas é maior quanto maior o tamanho de partícula e menor a sua concentração em volume na dispersão, acarretando em um dano menor à matriz de alumínio. O tamanho da partícula está também correlacionado com as propriedades mecânicas da dispersão. Partículas muito pequenas levam a maiores danos na matriz, levando a uma maior dureza e a perda de ductilidade. A ductilidade e a espessura da matriz não danificada ao redor das partículas combustíveis contribuem para prevenir a iniciação de trincas e a propagação de tensões que se desenvolvem devido ao inchamento das partículas. O ideal seria ter partículas maiores. No entanto, quanto maior o tamanho da partícula, menor a probabilidade de ser transmitido o calor gerado pela fissão. Hoje em dia é comum utilizar tamanhos de partículas para a fase dispersa na faixa de 44 a 150 μm (75 % em peso), permitindo somente uma quantidade limitada de pó mais fino menor do que 44 μm (25 % em peso). Testes posteriores em dispersões com baixo volume de fase dispersa mostraram que a estabilidade à irradiação e o inchamento não são influenciados pelo tamanho das partículas menores do que 44 μm , mas sim pela porosidade na partícula e na dispersão. Entretanto, a especificação acima tem sido mantida pela provada estabilidade sob irradiação dos combustíveis com essas características. A evidência de que partículas menores do que 44 μm não influenciavam a estabilidade sob irradiação de dispersões $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ com baixo volume da fase dispersa foi confirmada em experimentos posteriores no ORNL /5/. As seguintes conclusões foram obtidas desses experimentos: 1) dispersões $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ comportam-se satisfatoriamente a níveis de queima da ordem de 1,8 a 2,2 x 10^21 fissões/ cm^3 a temperaturas no combustível de 60 a 120 $^\circ\text{C}$ e a menores densidades de fissão a temperaturas até 200 $^\circ\text{C}$; 2) o inchamento sob irradiação é principalmente uma função da densidade de fissão e quantidade inicial de vazios na dispersão antes da irradiação; 3) desde que a quantidade de vazios aumenta com o aumento do carregamento do combustível, uma placa com um maior carregamento tende a inchar menos, quando irradiada a densidade de fissão equivalente; 4) o inchamento induzido pela irradiação é independente da quantidade de partículas combustíveis menores que 44 μm .

No final dos anos setenta, a preocupação com a proliferação de armas nucleares levou ao emprego de esforços para abaixar o nível de enriquecimento dos combustíveis para menos do que 20 % de enriquecimento do isótopo U-235. Para isso, a quantidade de urânio nas placas tinha que ser aumentado para manter o desempenho do reator. A máxima quantidade testada e qualificada de urânio com enriquecimento a 20 % tinha sido a dispersão 65 % U_3O_8 - 35 % Al em peso, descrita no início deste capítulo e utilizada posteriormente com sucesso no reator do Centro Nuclear de Porto Rico (PRNC). Então, este carregamento serviu de base para os posteriores aumentos do U_3O_8 em alumínio. O teste e a qualificação de combustíveis com alto carregamento de urânio iniciou-se sob o programa "U.S. Reduced Enrichment Research and Test Reactor (RERTR)" /6/ /7/ em várias frentes durante os últimos anos. Dentro do programa RERTR, um conjunto de exames pós-irradiação foi conduzido em placas miniaturas e elementos

combustíveis completos, contendo carregamento que variavam entre 65% e 75% em peso de U_3O_8 (35 a 44 % em volume, 2,47 a 3,12 gU/cm³). Os testes demonstraram que tanto as miniplacas como os elementos combustíveis têm desempenhado satisfatoriamente sob irradiação. As miniplacas atingiram queima máxima de cerca de 97,9 % de U-235 e os elementos combustíveis foram irradiados a cerca de 75 % de depleção de U-235. Recentemente, miniplacas contendo cerca de 44 a 55 % em volume de U_3O_8 (3,12 a 3,58 gU/cm³) foram irradiadas com desempenho satisfatório a 91 % de queima de U-235 /8/. Apesar do sucesso de irradiação de combustíveis com densidade entre 3,12 e 3,58 gU/cm³, em 1987, os participantes do programa RERTR consideravam como qualificados para uso corrente combustíveis a dispersão U_3O_8 -Al com densidades máximas até 3,2 gU/cm³, com enriquecimento até 20 % de U-235 /9/. A qualificação do combustível foi baseada no fato que dados suficientes existiam para que o órgão licenciador aprovasse seu uso.

O elemento combustível IPEN a ser utilizado no reator IEA-R1 consiste de 18 placas de combustível tipo MTR com cernes contendo 56,6 % em peso de U_3O_8 em alumínio ASTM-1100 (26,0 % em volume, 1,83 gU/cm³). A quantidade de porosidade calculada teoricamente para o cerne é de cerca de 11 % e a depleção máxima de U-235 (100 %) ocorre a uma densidade de $9,60 \times 10^{20}$ fissões/cm³. Alumínio ASTM 1060 é utilizado para moldura e revestimento e liga de alumínio ASTM 6262T6 é utilizado nas placas laterais, bocais e pinos de sustentação do elemento combustível. Os materiais e componentes dos elementos combustíveis IPEN/CNEN seguem rigorosamente os padrões internacionais, assim como as dimensões propostas para o combustível. De acordo com a revisão bibliográfica anterior é esperado para o combustível IPEN, a uma densidade de 1,83 gU/cm³, um comportamento estável sob irradiação. Como visto, o inchamento do combustível é dependente da densidade de fissão do cerne e da quantidade de porosidade de fabricação. A densidade de fissão máxima (100 % de depleção de U-235) para o combustível IPEN é relativamente baixa frente as densidades para as quais esse tipo de combustível tem sido testado internacionalmente. Parece certo que o combustível IPEN deve manter um inchamento negativo (contração) em relação a sua geometria inicial. As características dos pós de U_3O_8 e alumínio seguem rigorosamente os padrões internacionais quanto aos aspectos de densidade, morfologia, superfície específica e granulometria, garantido resultados idênticos aos combustíveis internacionais. O alumínio ASTM 1060 (características semelhantes ao alumínio ASTM-1100, com maior pureza) não apresenta problemas de corrosão a temperaturas abaixo de 100 °C. Como visto, o alumínio ASTM-1100 foi utilizado com sucesso como revestimento em combustíveis à dispersão U_3O_8 -Al (vide reator de Porto Rico) nas temperaturas e condições operacionais semelhantes às obtidas no reator IEA-R1. Critérios de projeto limitam a temperatura na parede do revestimento do combustível IEA-R1 em cerca de 100°C, garantindo um comportamento adequado para o revestimento. Apesar que combustíveis com alto carregamento de U-235 têm operado satisfatoriamente em testes a queimas de cerca de 75 % de depleção de U-235 e, segundo os pesquisadores do programa RERTR, não haja limitações para a queima a ser atingida, é recomendado que o combustível IEA-R1 seja irradiado a queimas máximas de 50 %, até que possa ser testado a queimas superiores em programas

experimentais. Esta depleção foi atingida com sucesso no combustível utilizado em Porto Rico (65 % U_3O_8 - 35 % Al), com mesmo tipo de revestimento e condições operacionais similares às do reator IEA-R1.

4. QUALIFICAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS IPEN/CNEN-SP SOB IRRADIAÇÃO

Como o Brasil não dispõe de laboratórios com células quentes para análise pós-irradiação, o programa de qualificação sob irradiação dos combustíveis de fabricação IPEN/CNEN-SP fica limitado a testes não destrutivos e observações visuais dentro da piscina do reator IEA-R1.

Em 1985 foram fabricados no IPEN/CNEN-SP 2 elementos combustíveis experimentais, que foram colocados no reator IEA-R1 para verificar o seu desempenho sob irradiação. Estes combustíveis têm projetos idênticos aos elementos combustíveis padrão, mas apenas com algumas placas combustíveis (um com 2 placas e o outro com 10 placas) sendo as outras placas de alumínio. A queima alcançada por estes combustíveis até dezembro de 88 foi da ordem de 8%. As observações realizadas sobre estes indicaram normalidade de desempenho, não demonstrando alterações dimensionais, corrosão por pitting nas placas e detecção de liberação de produtos de fissão. Hoje existem elementos combustíveis completos, de fabricação IPEN/CNEN-SP sendo irradiados no reator. Sobre estes também tem sido feito um acompanhamento de irradiação. Os critérios de irradiação para estes combustíveis impõem que eles comecem a ser irradiados em zonas de menor fluxo no reator e que, ao longo do tempo de irradiação, possam ser feitos remanejamentos de forma a aumentar a sua taxa de queima. As observações sobre os elementos combustíveis são feitas de forma sistemática, sendo coletadas informações e realizadas inspeções e testes. As informações são coletadas na fase de fabricação, durante irradiação e em inspeções periódicas programadas. As informações principais de fabricação constam dos documentos de fabricação e são: análise dimensional, teste de empolamento, localização da região do combustível e homogeneidade da dispersão na placa combustível. As informações de irradiação consideradas relevantes são: pH, temperatura e resistividade da água da piscina do reator e histórico de operação. Informações obtidas de cálculos neutrônicos e termo-hidráulicos são: fluxo, queima e distribuição de temperatura no combustível. Periodicamente podem ser feitos experimentos de mapeamento de fluxo do núcleo, através de técnicas de ativação ou por minidetectors, que confirmem o fluxo calculado. Está, também, em concepção um sistema de medida da queima dos combustíveis através da técnica de espectrometria gama. As inspeções visuais dos elementos combustíveis são: aparência externa, estabilidade dimensional, deposições superficiais, existencia de pontos de corrosão por pitting, desprendimento de bolhas e aspectos dos canais de refrigeração entre placas. Estas inspeções são feitas dentro da piscina do reator com o elemento combustível submerso, a uma profundidade suficiente para blindagem, sendo utilizado lente de aumento para facilitar a observação. Testes não destrutivos que podem ser realizados no elemento combustível são: neutrongrafia, que dá um indicativo da situação geométrica dos canais de refrigeração entre as placas combustíveis e localiza o cerne dentro da placa; e "sipping", que consiste na

passagem de água ou ar através do elemento combustível permitindo detecção de produtos de fissão caso haja alguma falha no combustível.

Com base neste programa de inspeções e testes pretende-se acompanhar os elementos combustíveis de fabricação IPEN/CNEN-SP sob irradiação, detectar possíveis ocorrências de alterações de desempenho, servindo de base de qualificação e garantia de desempenho para as etapas de queimas alcançadas.

5. REFERÊNCIAS

1. RICHT, A.E.; LEITTEN, C.F.; BEAVER, R.J.: Radiation Performance and Induced Transformations in Aluminum-Base Fuels, TID-7642, Research Reactor Fuel Element Conference, September 1962.
2. WALKER, V.A.; GRABER, M.J.; GIBSON, G.W.: ATR Fuel Materials Development Irradiation Results - Part II, IDO-17157 AEC Research and Development Report, TID-4500 1966.
3. LEITTEN, JR., C.F.; HOBSON, D. O.: Characterization of U₃O₈ Dispersions in Aluminum, ORNL-TM-1692 February 1967.
4. CINTRA, S.H.L. et alli: Análise de Variáveis do Processo de Fabricação de Placas com Núcleos de Dispersões Al-U₃O₈, XXIV Congresso Anual da ABM, São Paulo, Junho 1969.
5. MARTIN, M.M.; RICHT, A.E.; MARTIN, W.R.: Irradiation Behavior Aluminum-Base Fuel Dispersion, ORNL-4856, May 1973.
6. SNELGROVE, J.L.: RERTR Program Fuel Testing and Demonstration-An Update, Proceedings of the 1984.
7. HROVAT, M.F.; HASSEL, J.W.: Recent Status of Development and Irradiation Performance of Nukem Plate Type Fuel Elements with High Uranium Densities, Proceedings of the 1984 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor, Pg. 123/131, ANL/RERTR/TM6, CONF-8410173, October 1984.
8. GOMES, J. et alli: Post Irradiation Examination of High-U-Loaded, Low Enrichment U₃O₈, UAl₂ and U₃Si₂ Test Fuel Plates, Proceedings of the 1984 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor, Pg. 86/102, ANL (RERTR) CONF-8410173, October 1984.
9. SNELGROVE, J.L.: Qualification Status of LEU Fuels, 1987 - International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Buenos Aires-Argentina, September 1987.