

A TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR A BASE DE DISPERSÃO NO INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES IPEN/CNEN-SP

M. Durazzo ¹, E. F. Urano de Carvalho ¹, A. M. Saliba-Silva ¹, J. A. B. Souza ¹,
H. G. Riella ²

¹ Centro do Combustível Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
ipen/cnen-SP

² Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Preocupado com o contínuo aumento da demanda por radiofármacos, o IPEN/CNEN-SP tem despendido grande esforço para aumentar a sua produção de radioisótopos. Para alcançar esse objetivo, a potência do reator de pesquisas IEA-R1 foi recentemente aumentada de 2 MW para 3,5 MW. Numa época de incertezas no mercado internacional e buscando a garantia de fornecimento contínuo de combustível para o seu reator, o IPEN iniciou em 1985 o desenvolvimento da tecnologia de fabricação do combustível tipo placa a base de dispersão para uso em reatores de pesquisa. Desde 1988, inicialmente usando a dispersão U_3O_8-Al com densidade de urânio de $1,9 \text{ gU/cm}^3$, o IPEN tem obtido sucesso no desenvolvimento da tecnologia de fabricação desse tipo de combustível com densidades de urânio cada vez mais elevadas, acompanhando o aumento das necessidades do reator IEA-R1. Este trabalho descreve os avanços obtidos e o estado atual de desenvolvimento dessa tecnologia no IPEN.

Palavras-chave: siliceto de urânio, combustível nuclear, dispersões, fabricação.

INTRODUÇÃO

O uso de radioisótopos na medicina certamente é uma das mais importantes aplicações sociais da energia nuclear e o IPEN/CNEN-SP tem um papel especial na história da medicina nuclear no Brasil. Devido ao monopólio federal, somente Institutos pertencentes à CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) podem

produzir radioisótopos e radiofármacos para uso na medicina nuclear. A produção do IPEN representa aproximadamente 98% do total produzido.

Através dos anos, tem ocorrido um significativo aumento na demanda de radioisótopos. Entre 2002 e 2004 o aumento na demanda foi de cerca de 30 %. Distribuídos para hospitais e clínicas espalhadas pelo Brasil, os radiofármacos produzidos no IPEN foram usados, em 2006, para atendimento de mais de 3 milhões de pacientes, o que representou um aumento de cerca de 10 % com relação ao ano anterior. Para enfrentar esse cenário, o IPEN tem aumentado continuamente sua produção de radiofármacos.

Um dos mais importantes projetos objetiva a produção nacional de Mo-99 para prover geradores de Tc-99 mais baratos do que os produzidos com matéria-prima importada. Dessa forma, esse medicamento será acessível a um número maior de pacientes. Para atingir o objetivo desse projeto, o IPEN por anos tem despendido esforços para modernizar o seu reator de pesquisas IEA-R1, visando o aumento de sua potência (de 2 para 5 MW) e sua rotina operacional (de 64 para 120 horas semanais). A mesa de controle do reator e o sistema de ventilação foram modernizados e itens adicionais de segurança foram incorporados. Além disso, existem planos para construir um novo reator produtor de radioisótopos para expandir o uso da medicina nuclear, espalhando seu benefício pelos quatro cantos do país.

Uma vez que a potência do reator estava planejada para ser aumentada, em 1997 o IPEN iniciou atividades de pesquisa com objetivo de aumentar a densidade de urânio contido no combustível que fabricava para o reator IEA-R1, de forma a tornar possível o aumento de potência planejado. Isso poderia ser obtido com o desenvolvimento da tecnologia do siliceto de urânio, o que foi realizado com apoio de um Projeto de Cooperação Técnica junto à AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica), designado BRA/4/047 "Fuel Improvement for the IPEN Research Reactor". Esse projeto teve por objetivo desenvolver combustíveis de alta densidade de urânio para ampliar a eficiência e aplicabilidade do reator do IPEN. Até o presente momento, quatorze elementos combustíveis de siliceto de urânio, com $3,0 \text{ gU/cm}^3$, foram ou estão sendo irradiados no reator IEA-R1. A irradiação tem sido acompanhada de perto por meio de inspeções visuais e testes de vazamento (sipping test). Após queima média de 40 % nenhum problema relacionado com o desempenho do combustível foi registrado. O pó de U_3Si_2 utilizado até 2002 foi

importado da França, quando, então, o IPEN iniciou o desenvolvimento da tecnologia de reconversão para obter o pó de U_3Si_2 usando UF_6 enriquecido no Brasil, produzido pelo CTMSP (Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo). Atualmente o IPEN está habilitado para fabricar o pó de U_3Si_2 enriquecido, possibilitando a nacionalização de todo o ciclo de fabricação do combustível à base de dispersão para reatores de pesquisas. Após as etapas de mineração e enriquecimento, o IPEN é capaz de executar todas as demais etapas da fabricação desse tipo de combustível. Recentemente, no dia 26 de junho de 2007, o primeiro elemento combustível de siliceto de urânio, fabricado com materiais e tecnologia totalmente nacional, foi inserido para operar no caroço do reator IEA-R1. Assim, o Brasil é agora totalmente independente em termos de materiais e tecnologia para fornecer elementos combustíveis para os seus reatores de pesquisas produtores de radioisótopos. Essa é uma importante conquista tecnológica para o país, pois o coloca no mercado internacional, ao lado de um restrito grupo de fornecedores comerciais desse tipo de combustível.

Este trabalho descreve brevemente a jornada do IPEN rumo ao aprendizado e domínio da tecnologia do combustível de dispersão, culminando na implantação no IPEN do combustível de siliceto de urânio.

BASE HISTÓRICA

O início do desenvolvimento da tecnologia de fabricação de elementos combustíveis no IPEN é muito antigo. O trabalho foi iniciado ainda na década de 60 com objetivo de fabricar o combustível para o reator de pesquisas ARGONAUTA, do Instituto de Engenharia Nuclear da CNEN. Entre 1964 e 1965 foram fabricados os elementos combustíveis para esse reator, usando pó de U_3O_8 enriquecido a 20 % em U^{235} , o qual foi fornecido pelas Nações Unidas dentro do programa “Átomos para a Paz” [1,2]. Apesar da baixa exigência tecnológica do combustível do reator ARGONAUTA, o qual é de muito baixa potência, da ordem de kW, nessa época foi plantada uma semente que viria a germinar 20 anos mais tarde, na década de 80, quando se retomaram no IPEN as pesquisas na área do combustível a base de dispersão [3,4,5]. A semente viria a florescer definitivamente na década de 90, quando o IPEN dominou a tecnologia e iniciou a produção do combustível para o reator IEA-R1. A relativamente maior potência (2 MW) demandou um significativo progresso tecnológico nas técnicas de fabricação.

A partir de 1980, então, o IPEN intensificou seus esforços para desenvolver a tecnologia de fabricação de elementos combustíveis a base de dispersão, com o objetivo de atualizar a tecnologia para fabricar um combustível mais avançado, substancialmente superior ao antigo combustível do ARGONAUTA. Naquele tempo o IPEN não pode adquirir combustível no mercado internacional para suprir o reator IEA-R1, devido a restrições comerciais relacionadas a programas de não proliferação de armas nucleares. A crescente dificuldade para adquirir elementos combustíveis no mercado internacional atuou como força impulsora para o IPEN deflagrar seu programa de fabricação própria do elemento combustível. A tecnologia previamente desenvolvida nos anos 60 foi atualizada a partir de 1985, com base nos mais recentes avanços tecnológicos na área. Entre 1985 e 1988, o IPEN trabalhou na montagem de uma pequena instalação de fabricação em escala de laboratório, com capacidade para produzir 6 elementos combustíveis anualmente. Essa capacidade era suficiente para suprir o reator IEA-R1 operando a 2 MW 64 horas por semana.

Em 31 de agosto de 1988, como parte das comemorações do seu 32º aniversário, o IPEN proveu o reator IEA-R1 com o primeiro elemento combustível fabricado no Brasil, apenas onze dias antes da exaustão do combustível do reator. O material físsil usado foi o mesmo usado na fabricação do combustível para o ARGONAUTA. Existia uma reserve de cerca de 30 kg desse material. A partir de 1988, após a produção do primeiro elemento combustível, o IPEN iniciou a produção rotineira de elementos combustíveis, a qual continua até os dias de hoje.

Após a produção de 26 elementos combustíveis, o pó de U_3O_8 enriquecido terminou em 1996. Por esse motivo, em 1994 o IPEN iniciou o desenvolvimento do processo de reconversão do UF_6 ao U_3O_8 e a recuperação do urânio contido nos refugos de fabricação. In 1996 o IPEN realizou a reconversão de cerca de 20 kg de UF_6 importado. O IPEN estava então preparado para assumir a produção rotineira de elementos combustíveis partindo do UF_6 como matéria-prima. Em 1997 o IPEN aumentou a capacidade de produção de 6 elementos combustíveis anuais para 10, máxima capacidade possível considerando-se a infra-estrutura disponível.

Como mencionado anteriormente, para aumentar a capacidade de produção de radioisótopos do IPEN, a potência do reator IEA-R1 foi aumentada de 2 MW to 5 MW. Nesse contexto, em 1997 foi iniciado o desenvolvimento de um novo combustível com densidade de urânio sensivelmente superior, para atender à

necessidade de reatividade visando à operação contínua, para ter um núcleo do reator mais compacto para otimizar o fluxo de nêutrons e para gerar um menor número de elementos combustíveis queimados na piscina de estocagem do reator. O novo combustível adotou a dispersão U_3Si_2 -Al em substituição à dispersão U_3O_8 -Al, atingindo-se, em curto espaço de tempo, a densidade de $3,0 \text{ gU/cm}^3$. Em 1998 a tecnologia de fabricação do novo combustível de siliceto de urânio foi implantada, mas o pó de U_3Si_2 ainda era importado. Entre 1999 e 2000 dezesseis elementos combustíveis a base de U_3Si_2 foram produzidos. A partir de 1998 se iniciou o desenvolvimento da tecnologia de produção do pó de U_3Si_2 , buscando a nacionalização de todo o processo, partindo do UF_6 enriquecido e reconvertendo-o para UF_4 , o qual é reduzido para urânio metálico que é material-prima para a produção do pó de U_3Si_2 , chegando, finalmente, à fabricação das placas combustíveis e à montagem do elemento combustível. Nessa época, o IPEN procurou por cooperação internacional por meio da Agência Internacional de Energia Atômica e teve um Projeto de Cooperação Técnica aprovado, designado BRA/4/047.

Com ajuda da cooperação internacional, em 1999 o IPEN dominou a tecnologia da produção de UF_4 usando o $SnCl_2$ como agente redutor. Na área do urânio metálico, o IPEN tinha uma valiosa experiência anterior, adquirida nos anos 90, na produção de grandes lingotes de urânio natural, com 150 kg. Com base nessa experiência, o IPEN iniciou esforços no sentido de diminuir o tamanho das peças de urânio metálico, tentando produzir peças com cerca de 3 kg, agora usando material enriquecido a 20 % em U^{235} para ser usado como material-prima para a produção do U_3Si_2 . Em 2002 o processo de fabricação do urânio metálico estava dominado, o que tornou possível o desenvolvimento do processo de fabricação dos intermetálicos U_3Si_2 . Em 2004 o IPEN obteve o primeiro lote de pó de U_3Si_2 natural fabricado com tecnologia nacional, dominando o que foi chamado de “Ciclo do Siliceto de Urânio”. Em 2006 o IPEN consolidou a tecnologia de fabricação do combustível a base de U_3Si_2 com a fabricação do primeiro elemento combustível de siliceto de urânio com tecnologia totalmente nacional. Esse elemento combustível, designado IEA-202, entrou para operar no caroço do reator IEA-R1 no dia 26 junho de 2007. Agora, os esforços no desenvolvimento do combustível tipo dispersão estão direcionados para o aumento da densidade de urânio. Inicialmente, em curto prazo, pretende-se produzir e qualificar o combustível a base de U_3Si_2 com $4,8 \text{ gU/cm}^3$, o qual é o combustível comercial mais avançado nos dias de hoje. No futuro, em médio prazo,

o objetivo é obter a tecnologia de fabricação do combustível de dispersão a base da liga UMo, atualmente em fase de qualificação pela comunidade científica internacional.

Com o aumento da potência e do regime de utilização do reator IEA-R1, aumentou também sua necessidade de combustível, passando de 6 elementos combustíveis anuais, de U_3O_8 -Al, para 18, de U_3Si_2 . Além disso, para enfrentar o contínuo aumento da demanda de radioisótopos, cogita-se a construção de um novo reator de pesquisas produtor de radioisótopos na região nordeste do Brasil. Essa decisão será muito importante (e provável) no futuro, tendo em vista a avançada idade do reator IEA-R1, que é praticamente o único reator produtor de radioisótopos do país. Esse novo reator, com potência provável ao redor de 20 MW, consumirá cerca de 30 elementos combustíveis anualmente. Assim, uma demanda de cerca de 50 elementos combustíveis parece ser bastante realista no futuro.

Considerando essa previsão de necessidades de elementos combustíveis e a necessidade urgente de ampliar a capacidade de produção atual do IPEN, para 18 elementos combustíveis por ano, em 2001 iniciou-se um projeto para promover a adaptação da infra-estrutura com vista ao aumento da capacidade de produção. Atualmente esse projeto está em andamento e prevê a montagem de uma nova unidade de fabricação de elementos combustíveis, substituindo-se a atual infra-estrutura, de caráter laboratorial. A nova unidade de fabricação está planejada para ter uma capacidade de produção nominal de 30 elementos combustíveis anuais. Esta capacidade atenderá integralmente a demanda de elementos combustíveis em curto prazo. A capacidade de produção dessa nova unidade poderá atingir 80 elementos combustíveis anuais, o que supriria também o novo reator de pesquisas planejado para ser construído. A conclusão desse projeto está prevista para 2008-2009.

Preparando-se para o futuro, em 2001 o IPEN começou atividades envolvendo a liga UMo, em contribuição com o programa RERTR (Redução de Enriquecimento para Reatores de Pesquisas e Testes de Materiais) para desenvolvimento de combustíveis com alta densidade de urânio. No futuro, esse combustível deverá substituir com vantagens o combustível U_3Si_2 . Atualmente esse trabalho está em curso e também é apoiado por um Projeto de Cooperação Técnica da AIEA, designado BRA/4/053 "Development of Alternative High-Density Fuel Based on Uranium-Molybdenum Alloys".

O aumento no regime de produção de elementos combustíveis irá gerar grandes quantidades de resíduos líquidos, sólidos e gasosos, considerados poluentes, os quais devem ser manuseados cuidadosamente. A maior escala de fabricação da nova instalação de produção introduz dificuldades técnicas relacionadas à melhoria dos procedimentos de recuperação de urânio e de tratamento de efluentes e disposição de resíduos. Como a infra-estrutura para fabricação de placas combustíveis já está adequada para enfrentar o novo nível de produção, as principais modificações e ajustes deverão ser realizados nos processos químicos envolvidos na recuperação de urânio de refugos da fabricação e no tratamento de resíduos líquidos e gasosos, incluindo aerossóis, gerados pelo novo regime de produção. Para enfrentar esse novo desafio, o IPEN novamente procurou por cooperação internacional com o apoio da AIEA, obtendo, em 2007, a aprovação de mais um Projeto de Cooperação Técnica, designado BRA/3/012 “Nuclear Fuel for Research Reactors: Improving Fabrication and Performance Evaluation in Brazil”. Os resultados desse projeto irão garantir que a nova instalação de produção atenda integralmente aos requisitos ambientais impostos pela legislação brasileira.

DESENVOLVIMENTO DO COMBUSTÍVEL A BASE DE SILICETO DE URÂNIO

O reator IEA-R1 do IPEN/CNEN-SP é um reator tipo piscina em operação desde 1957 [6]. O reator usa elementos combustíveis tipo MTR à base de dispersão numa configuração do núcleo de 5X5 elementos combustíveis. O Centro do Combustível Nuclear-CCN do IPEN é responsável pela produção do combustível nuclear necessário para a operação contínua do reator. O desenvolvimento de novas tecnologias também é uma preocupação permanente. Até o presente momento, o Centro do Combustível Nuclear produziu 77 elementos combustíveis, incluindo 14 elementos combustíveis de controle.

O núcleo da placa combustível é fabricado de acordo com técnicas tradicionais de metalurgia do pó. O elemento combustível contém 18 placas combustíveis, todas com espessura de 1,52 mm. As placas de revestimento e moldura são feitas com a liga de alumínio ASTM 6061. O conjunto para laminação é preparado de acordo com a conhecida técnica de montagem núcleo-moldura-revestimentos (picture frame technique). O elemento combustível resulta da montagem mecânica de 18 placas combustíveis e outros componentes estruturais. A figura 1 mostra detalhes da fabricação da placa combustível e a geometria do elemento montado.

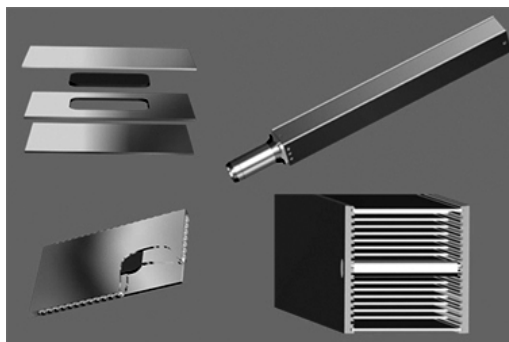


Figura 1 – Elemento combustível fabricado no IPEN.

Como o Brasil não possui laboratórios de células quentes para teste de combustíveis queimados, para estudo de seu desempenho, e a irradiação fora do país seria muito cara, o IPEN decidiu testar e avaliar seu combustível sob irradiação, durante a sua operação no reator IEA-R1. Isso foi possível devido ao fato da especificação do combustível ser muito conservativa para um combustível a base de dispersão e da potência do reator ser baixa. Um programa de qualificação sob irradiação foi iniciado com a irradiação de algumas miniplacas na periferia do caroço do reator, apenas para identificar qualquer evento anormal. Em julho de 1985 um elemento combustível parcial com apenas duas placas combustíveis e 16 placas de alumínio foi inserido no caroço do reator para iniciar a qualificação do combustível. Depois disso, outro elemento combustível parcial, este com 10 placas combustíveis e 8 de alumínio, foi também inserido no caroço, em novembro de 1985. Esses dois elementos combustíveis foram identificados como os combustíveis precursores, cuja irradiação foi intensamente monitorada e avaliada. Após bons resultados obtidos com os elementos combustíveis precursores, em agosto de 1988 foi decidido iniciar o suprimento do reator com elementos combustíveis fabricados no IPEN, os quais possuíam densidade de $1,9 \text{ gU/cm}^3$ e usava a dispersão $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$. A estratégia adotada previa que cada elemento combustível novo iniciasse a irradiação na periferia do caroço do reator, sob baixas densidades de potência, até atingir a queima de 4 %, o que correspondia a quase um ano de operação. A partir daí ele poderia, então, ir para posições mais internas do caroço, operando sob densidades de potência mais altas.

O ultimo elemento combustível precursor foi retirado do caroço sem apresentar qualquer tipo de problema. Detalhes sobre o programa de qualificação do combustível podem ser obtidos na literatura [7]. Para qualificar o combustível a base

de U_3Si_2 -Al foi adotada a mesma estratégia. Nesse caso, a fração volumétrica da fase físsil na dispersão foi mantida a mesma existente no combustível U_3O_8 -Al já qualificado, ao redor de 27 %, o que resultou na densidade de urânio de $3,0 \text{ gU/cm}^3$.

O programa para o desenvolvimento do combustível de siliceto de urânio no IPEN teve um grande impulso após a aprovação do projeto BRA/4/047 “Fuel Improvement for the IPEN Research Reactor” da AIEA, em 1999. O principal objetivo do projeto foi o de desenvolver no IPEN todo o processo de fabricação do combustível a base da dispersão U_3Si_2 -Al (incluindo alta densidade, de $4,8 \text{ gU/cm}^3$), realizar seu teste sob irradiação no reator IEA-R1 e a análise pós-irradiação. Esse objetivo daria a necessária base para o IPEN produzir e qualificar seu próprio pó de U_3Si_2 e as placas combustíveis de siliceto. As etapas do projeto foram as seguintes:

- a) desenvolver o processo de produção do UF_4 partindo do UF_6 ;
- b) desenvolver o processo de produção do urânio metálico partindo do UF_4 ;
- c) desenvolver o processo de produção do pó de U_3Si_2 ;
- d) produzir miniplacas com 20 % de enriquecimento para testes de irradiação;
- e) irradiar miniplacas no reator IEA-R1 e realizar análises não-destrutivas na piscina do reator.

Informações mais detalhadas podem ser obtidas nos relatórios de progresso desse projeto [8,9,10]. As principais adaptações ao processo correntemente adotado para a fabricação do combustível U_3O_8 -Al foram nas etapas de reconversão do UF_6 a UF_4 , de redução do UF_4 a urânio metálico, na obtenção do siliceto de urânio U_3Si_2 e na preparação de pós desse material.

Essencialmente, o processo para se obter o UF_4 a partir do UF_6 baseia-se na redução do urânio hexavalente presente numa solução aquosa ao seu estado tetravalente, seguida de precipitação pela adição de uma solução de HF. A precipitação do UF_4 usando redução química é realizada partindo-se de uma solução de UO_2F_2 resultante da hidrólise do UF_6 . O $SnCl_2$ foi o agente redutor que proporcionou os melhores resultados, atingindo-se o nível de precipitação do UF_4 na faixa de 98%. Detalhes sobre os procedimentos de precipitação do UF_4 foram anteriormente publicados e estão disponíveis na literatura [11]. O intermetálico U_3Si_2 é produzido a partir do urânio metálico, ao qual é adicionado silício metálico numa operação de fusão. O IPEN desenvolveu um processo para produzir pequenas quantidades de urânio metálico (1000 g) adotando a magnesioterapia. O lingote de

urânio metálico obtido é refundido num forno de indução com adição de silício metálico. A fusão é realizada utilizando-se um cadinho de zircônia. Em termos gerais, a qualidade do material obtido atende integralmente às especificações vigentes, sendo comparável ao material comercializado no mercado internacional.

A próxima etapa foi adequar os procedimentos de fabricação para produzir combustíveis de U_3Si_2 com a máxima concentração possível de urânio, de 4,8 gU/cm³. Foram fabricadas 22 miniplacas com núcleos de dimensões aproximadas de 120 mm de comprimento por 42 mm de largura. A espessura do revestimento sobre as zonas de defeito (dogboning) atendeu com folga a especificação vigente, com uma espessura mínima de 0,28 mm (o mínimo especificado é 0,25 mm). Todas as miniplacas fabricadas mostraram uma boa ligação metalúrgica entre o núcleo e os revestimentos. A figura 2a mostra uma radiografia de uma das miniplacas fabricadas com dispersão U_3Si_2 -Al com densidade de urânio de 4,8 gU/cm³. A figura 2b mostra uma radiografia ilustrando as dimensões finais da miniplaca.

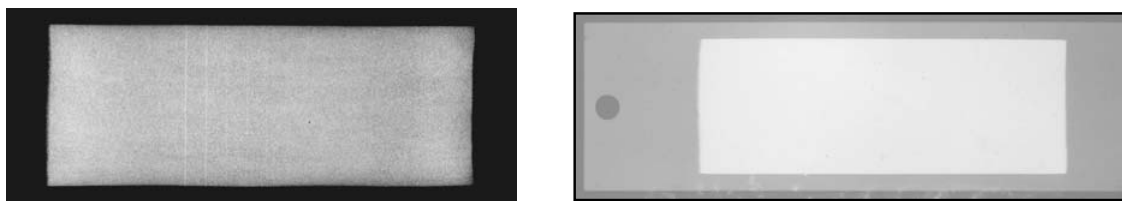


Figura 2 – Radiografias ilustrando o núcleo (a) e as dimensões finais (b) de uma das miniplacas de U_3Si_2 -Al com 4,8 gU/cm³.

Um sistema especial para irradiação de miniplacas foi projetado para ser posicionado na placa matriz do caroço do reator IEA-R1. Suas dimensões externas (elemento de irradiação) são muito similares às do elemento combustível. Ele foi projetado para acomodar as miniplacas para a irradiação e também permite que as mesmas sejam retiradas para avaliação de desempenho sob irradiação. A figura 3 ilustra os componentes do sistema de irradiação (miniplacas; suporte, elemento de irradiação).

A avaliação pós-irradiação inclui a medição da espessura da miniplaca, inspeção visual e teste de vazamento (sipping). O sistema de medição da espessura da miniplaca será operado dentro da piscina do reator, usando a própria água da piscina como blindagem. O sistema será operado da borda da piscina e será capaz de medir a variação da espessura da miniplaca ao longo da sua superfície. Isso

permitirá acompanhar o inchamento induzido pela irradiação. A figura 4 ilustra a estrutura de suporte e detalhes do sistema de medição de espessura.

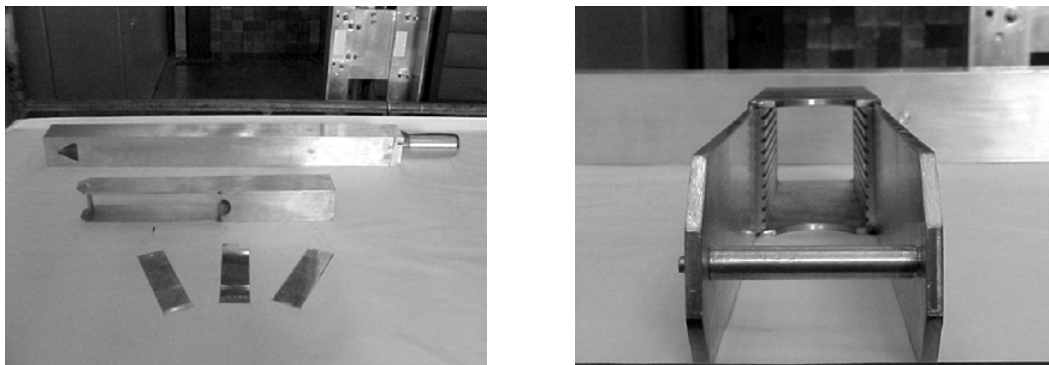


Figura 3 – Componentes do sistema de irradiação. À esquerda, elemento de irradiação, suporte e miniplacas. À direita, detalhe do suporte com capacidade de posicionar 10 miniplacas para irradiação.

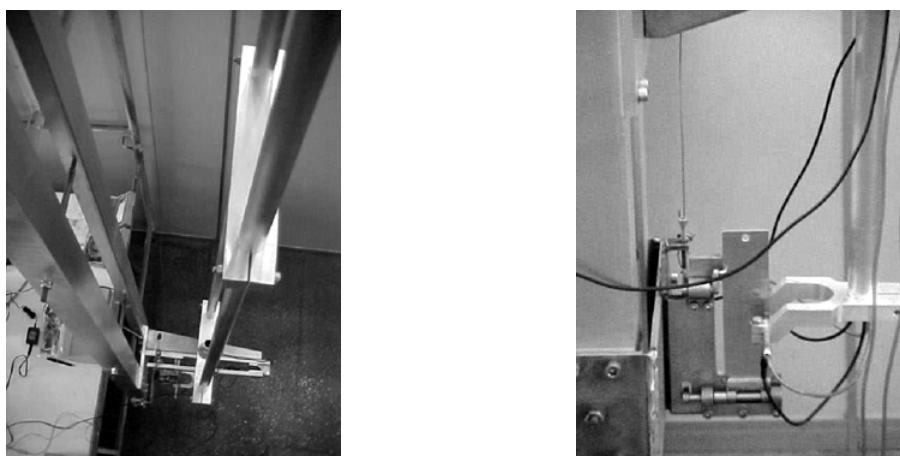


Figura 4 – Sistema de medição de espessura de miniplacas sob a água. À esquerda, estrutura mecânica de suporte. À direita, detalhes dos instrumentos de medição.

CONCLUSÃO

As atividades de desenvolvimento envolvendo a fabricação do combustível U_3Si_2-Al foram completadas satisfatoriamente. O próximo passo é fabricar placas combustíveis de tamanho normal a base de U_3Si_2-Al com $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Esse trabalho já foi iniciado. O início da irradiação está aguardando a aprovação final do experimento pelo Comitê de Segurança do Reator.

REFERÊNCIAS

- [1] SOUZA SANTOS, T.D.; HAYDT, H.M.; FREITAS, C.T. Fabricação de elementos combustíveis para o reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear. *Metalurgia*, v. 21 (90), p. 369-76, 1965.
- [2] SOUZA SANTOS, T.D.; HAYDT, H.M.; FREITAS, C.T. Principais características metalúrgicas dos elementos combustíveis produzidos para o reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear. *Metalurgia*, v. 21 (97), p. 369-76, 1965.
- [3] BRESSIANI, J.C.; DURAZZO, M.; RAMANATHAN, L.V.; FREITAS, C.T. Desenvolvimento de combustíveis de baixo enriquecimento para reatores de ensaios de materiais. In: XXXV CONGRESSO ANUAL DA ABM, São Paulo, SP, v. 3, p. 597-612, 1980.
- [4] RAMANATHAN, L.V.; DURAZZO, M.; FREITAS, C.T. Combustíveis para reatores de ensaios de materiais. In: XXXVII CONGRESSO ANUAL DA ABM, Rio de Janeiro, RJ, v. 1, p. 673-90, 1982.
- [5] FREITAS, C.T.; RAMANATHAN, L.V.; DURAZZO, M. Technology transfer and development of fuel for the IEA-R1 MTR. *Trans.Am.Nucl.Soc.*, v. 42, p. 88-90, 1982.
- [6] INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA. Reator de Pesquisas. São Paulo, 1958. (IEA-Pub-1)
- [7] PERROTA, J.A.; NETO, A.M.; DURAZZO, M.; SOUZA, J.A.B.; FRAJNDLICH, R. Irradiation Experience of IPEN Fuel at IEA-R1 Research Reactor. In: XXI INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS, São Paulo, Brazil, 18-23 October 1998.
- [8] DURAZZO, M.; PERROTA, J.A. Fuel Improvement for the IPEN Research Reactor. Semiannual Progress Report January-June 1999. IAEA Project Number BRA/4/047. IPEN, São Paulo, 1999.
- [9] DURAZZO, M.; PERROTA, J.A. Fuel Improvement for the IPEN Research Reactor. Semiannual Progress Report July-December 1999. IAEA Project Number BRA/4/047. IPEN, São Paulo, 1999.
- [10] DURAZZO, M.; PERROTA, J.A. Fuel Improvement for the IPEN Research Reactor. Semiannual Progress Report January-June 2000. IAEA Project Number BRA/4/047. IPEN, São Paulo, 2000.
- [11] FRAJNDLICH, E.U.C.; SALIBA SILVA, A.M.; ZORZETTO, M.A. Alternative Route For UF_6 Conversion Towards UF_4 to Produce metallic Uranium. In: XXI INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS, São Paulo, Brazil, 18-23 October 1998.
- [12] SALIBA SILVA, A.M.; SOUZA, J.A.B.; FRAJNDLICH, E.U.C.; PERROTA, J.A.; DURAZZO, M. First Results of U_3Si_2 Production and its Relevance in the Power Scale-up of IPEN Research Reactor IEA-R1m. In: XX INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS, Jackson Hole, Wyoming, 5-10 October 1997.

TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING DISPERSION NUCLEAR FUEL AT INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES IPEN/CNEN-SP

ABSTRACT

IPEN has been working for increasing radioisotope production in order to supply the expanding demand for radiopharmaceutical medicines requested by the Brazilian welfare. To reach this objective, the IEA-R1 research reactor power capacity was recently increased from 2 MW to 3.5 MW. Since 1988 IPEN has been manufacturing its own fuel element, initially based on U_3O_8 -Al dispersion fuel plates with 2.3 gU/cm^3 . To support the reactor power increase, higher uranium density had to be achieved for better irradiation flux and also to minimize the irradiated fuel elements to be stored. Uranium silicide was the chosen option. This paper describes the results of this program and the current status of silicide fuel fabrication and qualification.

Key-words: uranium silicide, nuclear fuel, dispersion, fuel fabrication.