



**ESTUDO DE FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS
PLANOS COM NUCLEO DE LIGA AL U**

**Francisco Ambrozio Filho Ney Freitas de Quadros
Helton Motta Haydt e Tharciso D de Souza Santos**

**ESTUDO DE FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS
PLANOS COM NÚCLEO DE LIGA AL U**

Francisco Ambrozio Filho Ney Freitas de Quadros
Heliton Motta Haydt e Tharciso D de Souza Santos

COORDENADORIA DE METALURGIA NUCLEAR
(CMN)

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
SÃO PAULO - BRASIL

CONSELHO DELIBERATIVO

Eng^o Hércio Modesto de Costa
Eng^o Ivano Humbert Marchesi
Prof. Admer Cervellini
Prof. Sérgio Mascarenhas de Oliveira
Dr. Klaus Reinach
Dr. Roberto D. Utra Vaz

SUPERINTENDENTE

Prof. Dr. Râmulo Ribeiro Pieroni

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11 049 (Pinheiros)
Cidade Universitária - Armando de Salles Oliveira
SÃO PAULO - BRASIL

ESTUDO DE FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS PLANOS COM NÚCLEO DE LIGA AL U⁽¹⁾

Francisco Ambrozio Filho⁽²⁾ Ney Freitas de Quadros⁽³⁾
Helton Motta Haydt⁽⁴⁾ e Tharciso D. da Souza Santos⁽⁵⁾

RESUMO

São realizados estudos experimentais de obtenção de placas combustíveis com núcleo de liga Al 18,4% U e revestimento de liga Al 1100 com espessura final de 1,53 mm. São estudados os efeitos do tratamento térmico da liga e utilização de núcleos paralelepípedicos e com perfil em ângulo de 120°. A temperatura de laminação a quente foi escolhida pela comparação das propriedades mecânicas obtidas com ensaios em diversas temperaturas. São mostrados os resultados de ensaios de empolamento, metalográficos, radiográficos, medida de radiação γ emitida e dimensionais que caracterizam as placas obtidas e comparam as variáveis estudadas. As ligas com tratamento térmico apresentam os melhores resultados. Não foi solução satisfatória a utilização do núcleo com perfil em ângulo.

1 – INTRODUÇÃO

A Coordenadoria de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica tem realizado vários estudos sobre a fabricação de elementos combustíveis planos com revestimentos de liga de alumínio e núcleo seja de dispersões U₃O₈/Al^(17,15) como é o caso do Reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear seja de ligas Al U^(10,11) utilizado no Reator IEA R1.

O fator determinante na escolha da faixa de composição das ligas Al U para reatores tipo MTR (Materials Testing Reactor) como o IEA R1 é o enriquecimento em U 235. Para altos teores de enriquecimento 90 a 93% de U 235 o teor de urânio em peso deve ser da ordem de 10 a 20%. Atualmente o reator do IEA utiliza urânio com 93% de U 235 e a Coordenadoria de Metalurgia Nuclear foi encarregada de estudar o processo de fabricação do elemento combustível com 18,3 ± 0,5%U. De acordo com as especificações a placa deve ter uma espessura de 1,53 mm. Embora estas possam ser feitas por co-fingotagem^(8,12) decidiu-se empregar a técnica normal de colaminação do núcleo com moldura e revestimento^(10,7,11) uma vez que a liga especificada apresenta propriedades adequadas ao emprego desta técnica⁽¹⁷⁾.

2 – ANÁLISE DE ALGUMAS VARIÁVEIS

Para a obtenção de chapa combustível com distribuição homogênea de urânio, caldeamento perfeito entre núcleo e revestimento e que esteja dimensionalmente correta, deve haver um rígido controle

(1) Trabalho apresentado ao XXX Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Rio de Janeiro, RJ, 29 de junho a 4 de julho de 1975.

(2) Membro da ABM, Mestre em Engenharia (Engenharia Metalúrgica), Chefe de Equipe, Coordenadoria de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, SP.

(3) Membro da ABM, Mestre em Engenharia (Engenharia Metalúrgica), Pesquisador Sênior, Coordenadoria de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, SP.

(4) Membro da ABM, Doutor em Engenharia (Engenharia Metalúrgica), Coordenadoria de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, SP.

(5) Membro Honorário da ABM, Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, USP, Coordenador Geral, Coordenadoria de Metalurgia Nuclear, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, SP.

nas etapas do processo. A uniformidade do urânio depende principalmente do método utilizado para preparação da liga enquanto que para atingir os outros dois objetivos mencionados, duas variáveis fundamentais devem ser consideradas: os materiais a serem empregados como núcleo e revestimento e a colaminação a quente.

Para a obtenção da liga Al-U geralmente dissolve-se urânio metálico em alumínio líquido^(7, 11) refundindo-se a liga a fim de diminuir a segregação^(9, 23). É muito difícil obter uma liga homogênea usando-se refundir duas ou três vezes o lingote⁽²³⁾. Como urânio enriquecido pode ser recebido na forma UF₆, a liga poderá ser obtida por redução direta com alumínio. Estudos deste tipo de reação foram realizados anteriormente⁽²²⁾.

A laminação a quente do conjunto apresenta um problema junto às extremidades do núcleo, seja a placa obtida por montagem em moldura⁽²³⁾, seja por lingotagem⁽¹²⁾: é o defeito halteres (dog bone effect). Este defeito aparece como um aumento da espessura do núcleo nas regiões terminais em relação à espessura do mesmo no centro. Consequentemente há uma redução da espessura do material de revestimento nessa região. Estudos anteriores mostraram que o efeito halteres é causado por uma diferença de plasticidade entre o material de revestimento e o material do núcleo^(7, 11, 23), quando o núcleo é mais resistente à deformação plástica do que o revestimento. Este defeito é sempre encontrado e o que se pode fazer é apenas minimizá-lo, procurando-se igualar as plasticidades dos materiais.

Consegue-se um abaixamento da plasticidade de liga Al-U submetendo-a a tratamentos térmicos, ou pela adição de elementos estabilizadores do UAl₃, evitando-se a sua transformação para UAl₄ pela supressão da transformação peritética^(9, 7). O elemento que melhor se comporta como tal é o Si, sendo o mais usado, principalmente com ligas de alto teor de urânio⁽²³⁾. Quanto ao tratamento térmico, a sua principal finalidade é globulizar o eutético⁽⁷⁾. Pode-se também empregar conjuntamente estas duas técnicas, pois não há reversão do UAl₃ para UAl₄ quando se tem silício na liga, durante o tratamento isotérmico⁽³⁾.

Por outro lado, pode-se igualar as plasticidades dos materiais escolhendo-se uma liga para revestimento que tenha limite de escoamento próximo ao limite de escoamento do núcleo^(11, 23). Se a resistência à deformação do material de revestimento for maior do que a do núcleo, haverá uma diminuição da espessura do núcleo na região terminal⁽¹¹⁾.

Outra maneira que se tem utilizado para diminuir o efeito halteres é a utilização de perfis diferentes da seção longitudinal do núcleo⁽¹¹⁾. A mudança para um perfil em ângulo é bastante comum e esta forma melhora o caldeamento núcleo-revestimento junto às extremidades⁽¹²⁾. No entanto, esta forma poderá causar uma diminuição da espessura em uma extensa região junto às extremidades do núcleo. Devido a isto, para o projeto do perfil deve-se levar em conta as especificações exigidas. Outras variáveis que afetam o efeito halteres são da etapa de colaminação a quente.

Na laminação a quente devem ser consideradas a temperatura de laminação, a redução total de espessura e a porcentagem de redução por passe⁽¹²⁾. O efeito halteres será mínimo quando, na temperatura utilizada, são próximos os limites de escoamento das ligas revestimento e núcleo. Também a grandeza do defeito terminal é diretamente proporcional à redução total e à porcentagem de redução por passe. No entanto é nesta operação que se verifica o caldeamento núcleo-revestimento, sendo tanto melhor quanto maiores esses parâmetros considerados. Desta forma verifica-se que o defeito terminal e o caldeamento são efeitos contravariantes, devendo haver um compromisso entre eles.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo utilizou-se como moldura e revestimento liga Al-1100. Preparou-se a liga alumínio-urânio por dissolução do urânio em alumínio⁽¹⁰⁾ obtendo-se a composição de 18,4% U. O vazamento foi efetuado em lingoteira de cobre sendo o lingote de 12 mm de espessura. O lingote foi laminado a 600°C até a espessura de 8 mm, quando foram tirados corpos de prova para ensaios de tração. Posteriormente a espessura foi reduzida até a espessura inicial de colaminação. A porcentagem nominal de redução por passe foi de 15%. Paralelamente submeteu-se uma liga Al-U de mesma composição, a um tratamento térmico para globulização de eutético. De experiência anterior⁽⁷⁾, considerou-se que 31 horas a 610 ± 10°C seria tempo suficiente para a finalidade desejada.

Todos os materiais utilizados foram submetidos a ensaios de tração em diversas temperaturas em uma máquina Instron, tendo sido utilizados corpos de prova de seção circular.

Ao lado dos núcleos paralelepípedicos convencionais para colaminação usaram-se núcleos com perfil da seção longitudinal com ângulo de 120° para as ligas sem e com tratamento térmico. A Figura 1 apresenta as duas formas de núcleo utilizados juntamente com a moldura e o revestimento.

Após a obtenção das partes componentes do conjunto mostrado na Figura 1 realizou-se em cada um dos componentes uma limpeza mecânica na superfície seguida de decapagem química. Esta foi feita em soda caustica em solução aquosa a 10% a temperatura de 80°C seguida de uma lavagem em água e neutralizada em ácido nítrico a 50%.

A ajustagem do núcleo para os núcleos paralelepípedicos, foi feita com aquecimento da moldura a 600°C e inserção do núcleo no seu interior a temperatura ambiente. As dimensões do núcleo eram ligeiramente inferiores às da cavidade da moldura o que fez com que a ajustagem fosse perfeita. A tabela I apresenta as dimensões iniciais do núcleo, da moldura, do alojamento do núcleo e do revestimento. Após a ajustagem o conjunto foi montado e soldado nas suas laterais⁽¹⁰⁾. Para os núcleos com perfil em ângulo as dimensões eram praticamente as mesmas e não ser no caso da moldura que era composta de quatro partes. Neste caso a ajustagem foi realizada a temperatura ambiente tendo sido mais difícil pois foi efetuada simultaneamente com a montagem e solda do conjunto.

Tabela I

Dimensões iniciais do núcleo, moldura, alojamento do núcleo e revestimento

Partes do Conjunto	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Núcleo	3,2	60,7	96,9
Moldura	3,2	115,0	150,0
Alojamento núcleo	—	60,1	96,0
Revestimento	3,2	115,0	150,0

A temperatura de colaminação a quente utilizada foi de 600°C sendo escolhida com base nos resultados dos ensaios mecânicos. A sequência de laminação com as porcentagens de redução foram as indicadas na tabela II⁽¹¹⁾. Também como prática de laminação, foi efetuada inversão após cada passe a fim de uniformizar a situação nas duas extremidades⁽¹²⁾. A laminação a frio foi realizada para ajustagem da espessura final. Realizaram-se ensaios de empolamento após a laminação a quente, bem como outros ensaios que caracterizaram as chapas combustíveis obtidas.

4 – RESULTADOS

4.1 – Ensaios Mecânicos

Os resultados obtidos nos ensaios de tração são mostrados na tabela III. A principal finalidade foi a comparação entre as propriedades mecânicas das ligas nas diversas temperaturas, principalmente quanto ao limite de escoamento (LE). Verifica-se que o LE cresce desde o Al 1100 até a liga sem tratamento térmico a não ser a 600°C quando as duas formas da liga Al U apresentam LE aproximadamente iguais. Nesta

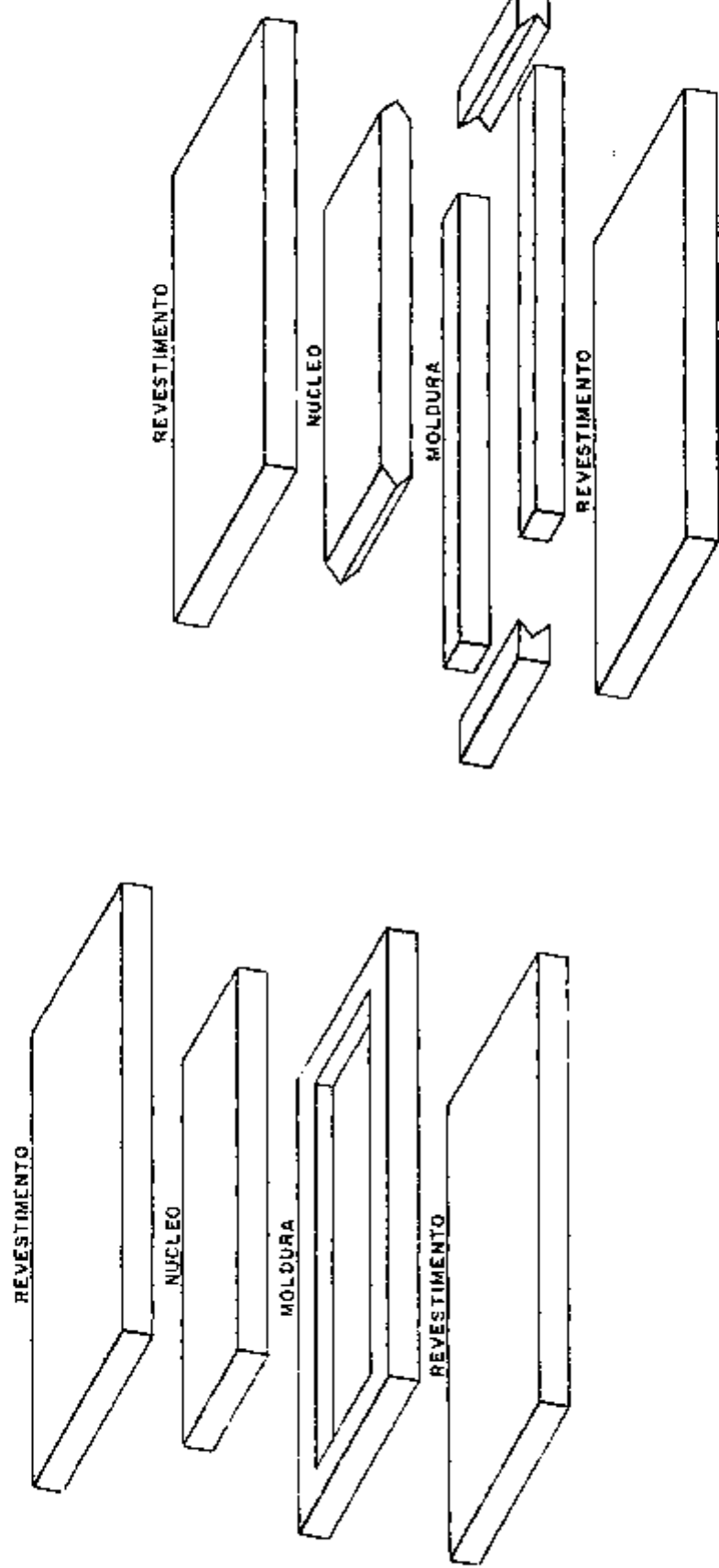


Figure 1 - Conjuntos núcleo moldura e revestimento utilizados para colimação

Tabela II

Porcentagens nominais de redução por passe da programação de laminação à quente

Numero do Passe	% Redução por passe
1	10
2	10
3	20
4	20
5	40
6	40

temperatura ha uma diferença entre os limites de resistencia (LR) para estas duas ligas sendo maior para a liga sem tratamento térmico. Comparando se os LE do Al 1100 e da liga com tratamento térmico verifica se que a relação entre os dois se mantém aproximadamente a mesma, independentemente da temperatura. A relação entre o LE da liga Al U sem tratamento térmico e a liga Al 1100 a temperatura de 600°C apresenta o menor valor em comparação com a mesma relação nas outras temperaturas ensaiadas. Devido a isso e também porque o caldeamento é mais fácil de ser conseguido à medida em que se aumenta a temperatura, optou se pela temperatura de 600°C para colaminação a quente. Discussão mais detalhada sobre os resultados desta tabela é encontrada em outro trabalho⁽¹⁴⁾

4.2 – Caldeamento

O ensaio de empolamento foi realizado após a laminação a quente para verificar o caldeamento nucleo revestimento, bem como fora desta região⁽²⁾. Foi efetuado por aquecimento da placa combustível a 500°C por 30 minutos com inspeção visual. Nas chapas com nucleo de ligas e bastante comum a falta de caldeamento nas extremidades do nucleo. Algumas chapas apresentaram este defeito notadamente as constituídas com nucleos de ligas sem tratamento térmico. A falta de caldeamento pode ser comprovada por metalografia. As Figuras 2 e 3 mostram duas micrografias a primeira com falta de ligação nucleo revestimento e a segunda perfeita sob este aspecto.

4.3 – Distribuição de Urânio

Foram realizados ensaios auto radiográficos e radiográficos das chapas combustíveis com o intuito de observar a homogeneidade de distribuição do urânio no nucleo bem como localizar e determinar o tamanho final do nucleo. As auto radiografias foram obtidas por exposição de filme Kodak Industrex AA por tempo de 90 horas. A Figura 4 apresenta a imagem auto radiográfica da parte de uma das chapas combustíveis. Verifica se uma mudança de tonalidade junto a extremidade do nucleo causada pelo efeito halteres que sera analisado no item 4.4. Não foi notada na chapa auto radiográfica uma mudança de tonalidade que pudesse ser considerada como falta de homogeneidade. O raio X utilizado foi de 45 kV com 10 s de exposição e filme Kodak Industrex AA. De acordo com trabalho anterior⁽⁷⁾, esta energia não foi

Tabela III

Propriedades mecânicas de Al 1100 e Al U determinadas em ensaios de tração a várias temperaturas e velocidade de deformação de $3 \times 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$. Valores médios

T °C	25°			500°			550°			600°		
	LE kg/mm ²	LR kg/mm ²	A %	LE kg/mm ²	LR kg/mm ²	A %	LE kg/mm ²	LR kg/mm ²	A %	LE kg/mm ²	LR kg/mm ²	A %
Liga Al 1100	4,4*	8,65*	30*	0,81	0,85	95,7	0,55	0,59	95,5	0,43	0,46	92
Liga Al 18,4%U	7,8	14,30	4	2,50	2,80	42,3	1,46	1,68	60,3	0,79	0,95	62,6
Liga Al 18,4%U Tratada termi- camente 610°C 31 h	5,8	10,8	14,9	1,50	1,58	53,5	1,12	1,14	58	0,84	0,85	53

* Valores para a liga recozida 610°C 4 horas

suficiente para uma boa revelação radiográfica sendo entretanto bastante útil para delimitação do núcleo. Está sendo montada uma nova unidade com maior energia que deverá auxiliar bastante neste ensaio.



Figura 2 — Seção longitudinal de chapa, com núcleo paralelepípedo, mostrando falta do caldeamento junto a extremidade do núcleo, após laminação a quente Liga A1 18,4%U sem tratamento térmico Aumento 80 X



Figura 3 — Seção longitudinal de chapa com núcleo em perfil em ângulo de 120° apresentando perfeito caldeamento núcleo revestimento Liga A1 18,4% de U com tratamento térmico Aumento 80 X

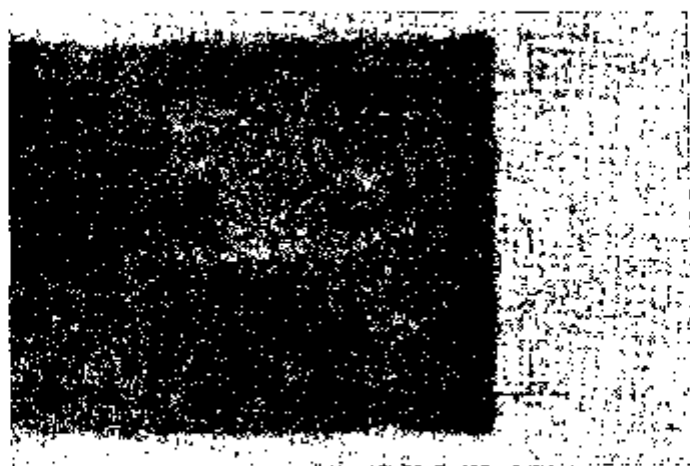


Figura 4 — Autoradiografia de uma região da placa combustível com núcleo em perfil de 120° e liga sem tratamento térmico Filme Kodak Industrex AA tempo de exposição 90 horas

Outro processo que foi utilizado para verificar a homogeneidade quantitativa da distribuição de urânio foi a medida da radiação γ emitida⁽¹³⁾. Esta radiação foi medida com um detetor de NaI (TL) de 20 X 20 mm² acoplado a um colimador de 10 X 10 mm². O mapeamento foi feito automaticamente e as leituras foram registradas em papel. A Figura 5 apresenta o perfil de distribuição de urânio no sentido longitudinal da placa combustível na região central do núcleo. Admitindo-se uma tolerância de 12% na homogeneidade⁽¹⁴⁾ (limites assinalados no gráfico da Figura 5) verificou-se que as placas tinham uma distribuição de urânio uniforme.

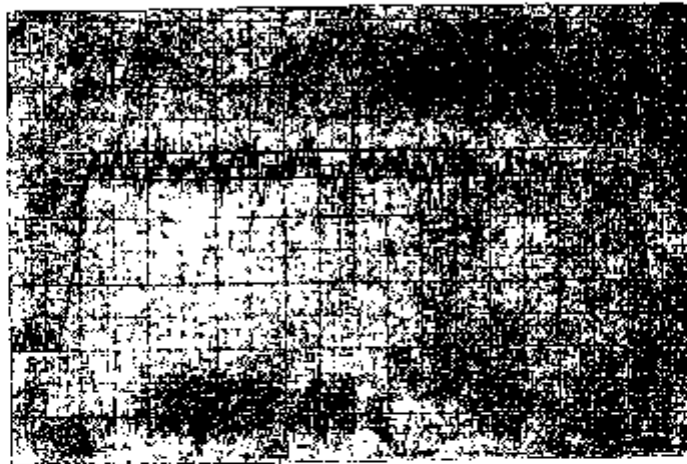


Figura 5 — Mapeamento de radiação γ emitida realizada longitudinalmente na região central da chapa com núcleo paralelepipedico e liga com tratamento térmico. Colimador 10 X 10 mm² constante de tempo 10 segundos fundo da escala 50 cps velocidade de mapeamento 1,7 cm/min

Atualmente está sendo desenvolvida a técnica para poder determinar a localização do núcleo bem como verificar a existência e grandeza do defeito terminal.

Quando foram determinados os valores das dimensões do núcleo, verificou-se que as larguras foram as mesmas, para as diferentes chapas combustíveis obtidas (62 mm). Observou-se uma pequena variação nos comprimentos, sendo ligeiramente maiores para as ligas com tratamento térmico (Valor médio 580 mm com flutuação observada menor que 2%).

4.4 — Efeito Halteres

Foram realizados ensaios micrográficos e dimensionais por metalografia para avaliação do efeito halteres. Para efeito de comparação a Figura 6 apresenta a extremidade do núcleo de uma chapa semelhante àquelas atualmente em uso no reator IEA R1. As Figuras 7 e 8 apresentam as seções longitudinais das chapas com núcleo paralelepipedico e perfil em angulo, respectivamente.

Comparando-se os núcleos paralelepipedicos, tem-se uma maior zona difusa (rabo de andorinha) para a liga com tratamento térmico que no entanto é menor que aquela apresentada pela chapa do IEA R1 da Figura 6. Também pelo exame destas figuras verifica-se que os núcleos com perfil em angulo apresentaram uma forma final do núcleo, nas extremidades mais uniforme que os paralelepipedicos.

A tabela IV apresenta as medidas de espessura do núcleo e do revestimento nas posições correspondentes indicadas na Figura 9. As medidas foram realizadas com aumento de 200 x e dispositivo de

varredura com passo de 0.01 mm. Verifica-se que as espessuras do núcleo e revestimento no centro da chapa guardam aproximadamente, a mesma relação inicial anterior a laminação. Outro fato que pode ser observado desta tabela é que a 15 mm das extremidades do núcleo já houve uma uniformização das espessuras, para todas as chapas.



Figura 6 — Seção longitudinal de placa combustível daquelas em utilização no reator IEA R1. Aumento 10 X

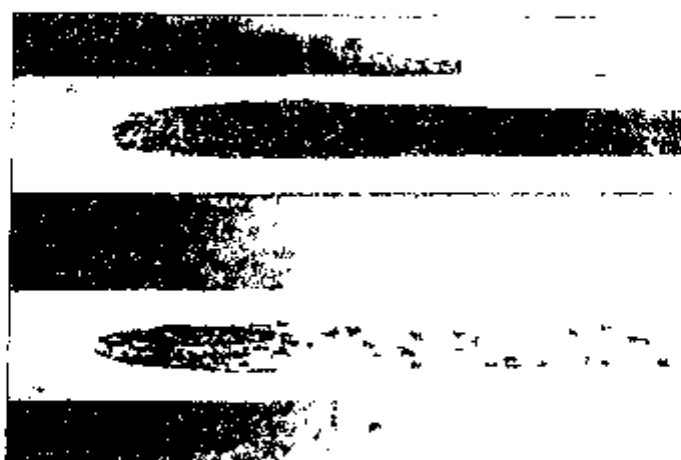


Figura 7 — Seções longitudinais das placas combustíveis com núcleos paralelepípedicos. Superior: liga sem tratamento térmico. Inferior: liga tratada termicamente. Liga Al 18.4% U. Aumento 10 X

Tabela IV

Medida de espessura do núcleo (N) e revestimento (R) nas posições indicadas na figura 9

Liga do Núcleo	AA1			AA2			BB3			CC2			CC1		
	R	N	R	R	N	R	R	N	R	R	N	R	R	N	R
L	0,42	0,74	0,46	0,52	0,54	0,56	0,56	0,60	0,50	0,54	0,52	0,56	0,40	0,78	0,44
LT	0,46	0,68	0,46	0,50	0,54	0,54	0,54	0,52	0,54	0,42	0,68	0,50	0,46	0,70	0,46
LA	0,42	0,78	0,38	0,46	0,54	0,46	0,54	0,52	0,54	0,50	0,52	0,54	0,32	0,92	0,32
LTA	0,38	0,70	0,44	0,50	0,54	0,50	0,56	0,52	0,52	0,48	0,54	0,52	0,38	0,78	0,38

Observação

- L — Liga sem tratamento térmico
- LT — Liga com tratamento térmico
- LA — Liga sem tratamento térmico e perfil em ângulo
- LTA — Liga com tratamento térmico e perfil em ângulo

Os resultados quanto ao efeito halteres, podem ser analisados pelo exame das Figuras 7 e 8 e dos dados da tabela IV nas posições AA1 e CC1. A relação entre a espessura do núcleo e a média aritmética entre os dois revestimentos, pode ser utilizada como uma medida do efeito halteres. A tabela V apresenta estas relações.

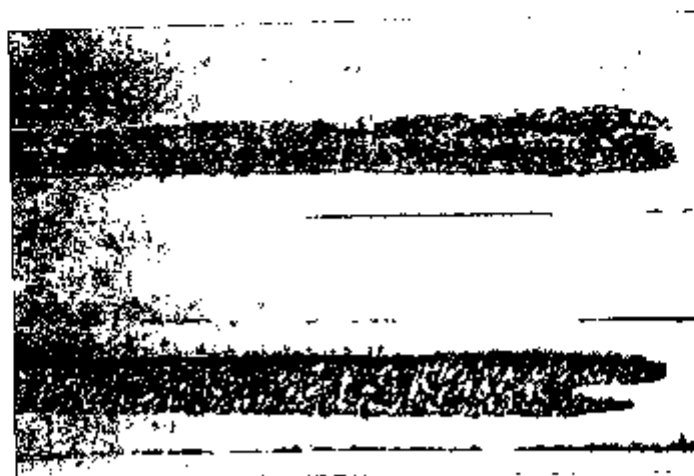


Figura 9 — Seções longitudinais de placas combustíveis com núcleo de perfil em ângulo. Superior: liga sem tratamento térmico, inferior: liga tratada termicamente. Liga A1: 18,4%U. Aumento: 10 X.

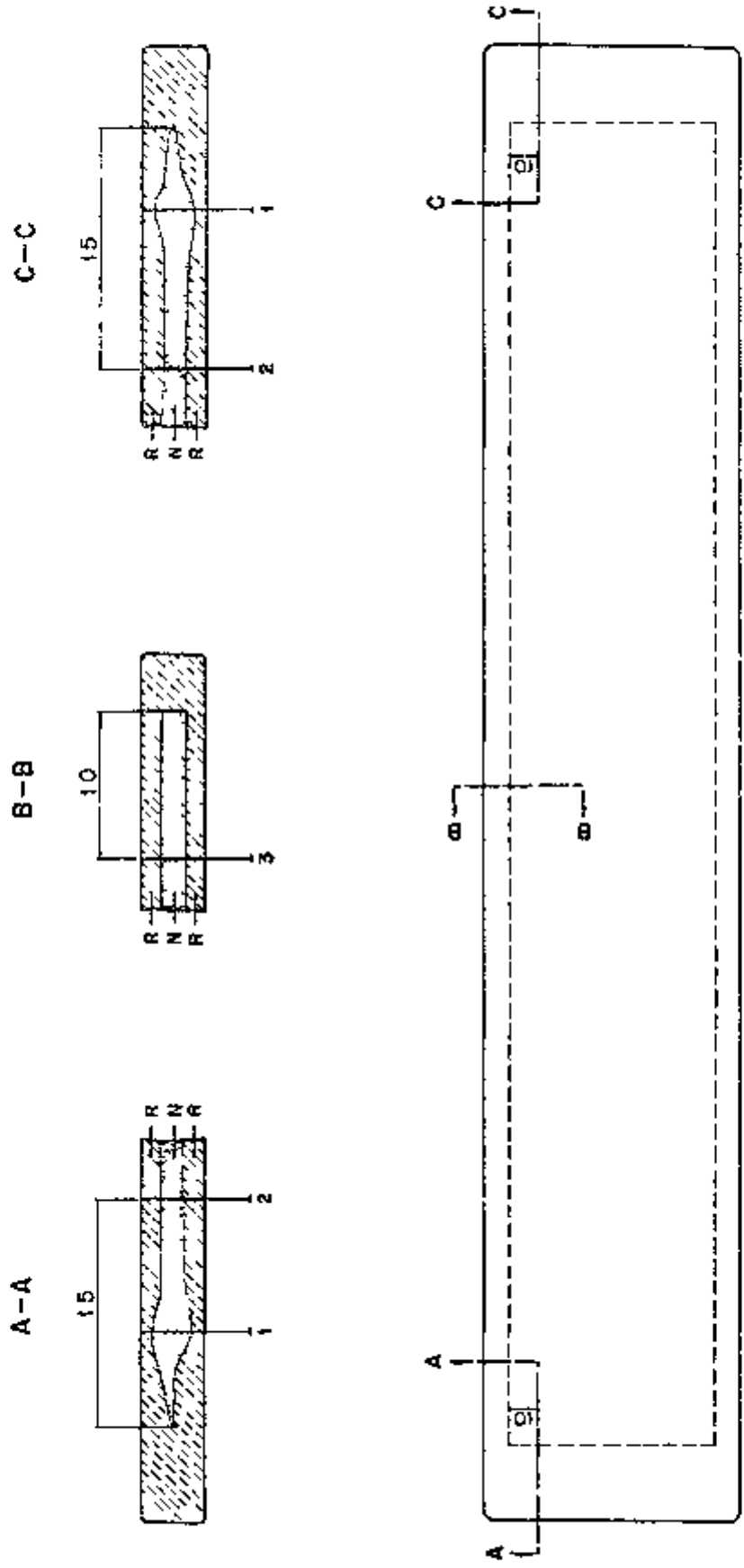


Figura 9 - Esquema mostrando as posições da chapa onde são medidas as espessuras do núcleo e revestimento para preenchimento da tabela IV

Tabela V

Relação entre espessura do núcleo e a média das espessuras dos revestimentos

Liga \ Posição	AAI	CCI
L	1,78	1,81
LT	1,48	1,52
LA	1,95	2,87
LTA	1,62	2,05

Do exame desta tabela e da observação das Figuras 7 e 8 pode-se observar a diminuição do efeito halteres com o tratamento térmico utilizado. Pode-se notar também que houve uniformidade de grandeza do efeito halteres para os núcleos paralelepípedicos, o que não ocorreu com os perfis em ângulo que apresentaram valores da relação da tabela V bastante diferentes para as duas extremidades da chapa. Houve ainda um aumento do efeito halteres para o núcleo com perfil em ângulo para uma mesma liga do núcleo. Isto indica que para se provocar uma diminuição do efeito halteres deveria ter sido utilizado um ângulo menor do que 120° evidenciando que a utilização de perfil em ângulo não é sempre satisfatória.

5 -- CONCLUSÕES

- 1) Os ensaios mecânicos realizados mostraram que a melhor temperatura de laminação é 600°C quando se utiliza liga Al 18,4% U no núcleo e revestimento de liga Al 1100.
- 2) Os ensaios de homogeneidade revelaram uma distribuição uniforme de urânio nas placas combustíveis.
- 3) As melhores placas combustíveis foram aquelas obtidas com núcleo tratado termicamente a 610°C .
- 4) O efeito halteres foi menor para as ligas tratadas termicamente.
- 5) Não foi solução satisfatória a adoção de núcleo com perfil de seção longitudinal em ângulo de 120° em substituição ao núcleo paralelepípedo.
- 6) A relação entre as espessuras do núcleo e revestimento se mantém após a laminação e não se altera nas extremidades, devido ao efeito halteres.

6 -- AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus agradecimentos pela colaboração prestada por Dra. Olga Y. Mafra e Marília Freitas Cesar da Coordenadoria de Física Nuclear pelos ensaios de medida de radiação γ , para controle da distribuição de urânio em chapas.

ABSTRACT

Experimental studies were carried out to obtain fuel plates with Al 18.4% alloy core and 1100 aluminum alloy clad with a final thickness of 1.53 mm. The effects of the alloy core heat treatment with different shapes were considered. The hot rolling temperature was chosen by comparing the results of the mechanical properties of tensile tests at different temperatures. The results of blister, metallographic and radiographic tests, dimension studies, and measurement of the gamma rays emitted by the fuel, characterizing the fuel plates, are presented to confront the variables.

Heat treated alloys gave the best results. The utilization of prismatic cores was not satisfactory.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMBROZIO FILHO F & VIEIRA R R. Microestruturas de solidificação de ligas Al-U (abstracts). In SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE, San Antonio, Texas. *IV interamerican conference on materials technology, June 29 July 4, 1975, Caracas, Venezuela, San Antonio, Texas, s.d.* p. 278-9.
- 2 AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. Hinsdale 111. *Quality control of plate type uranium aluminum fuel elements*. Hinsdale 111, 1967 (USA Standard USAS N 8.1.1967).
- 3 BOUCHER, R. Etude des alliages aluminium-uranium, application à l'état solide UAl₃, UAl₄. *J. Nucl. Mater.* Amsterdam 1, 13-27, 1959.
- 4 BR2 fuel element specification. Mol. November 1954, apud MEESTER, P. Fuel location, homogeneity and amount in flat and tubular configurations. In INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. *Non-destructive testing in nuclear technology proceedings held in Bucharest, 17-21 May 1965*. Vienna, 1965, v. 2, p. 413-36.
- 5 CAPOCCHI J. D. T. et alii. *Estudo de fabricação de elementos combustíveis planos com núcleos de cerâmicos 65% U₃O₈, 35% Al revestido com ligas de alumínio*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, dez. 1968 (IEA 178).
- 6 CINTRA S. H. L. et alii. *Análise de variáveis do processo de fabricação de placas combustíveis com núcleos de dispersão Al-U₃O₈*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, jan. 1970 (IEA 203).
- 7 _____ et alii. *Desenvolvimento de placas combustíveis contendo núcleos de ligas Al-20% U-8% Si*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, nov. 1968 (IEA 173).
- 8 FREITAS C. T. et alii. *Emprego de co-lingotagem para fabricação de elementos combustíveis*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, fev. 1972 (IEA 261).
- 9 GENTILE E. F. *Metalografia de ligas alumínio-urânio*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, nov. 1968 (IEA 164).
- 10 HAYDT, H. M. & CINTRA, S. H. L. *Nota preliminar sobre a fabricação de elementos combustíveis planos contendo núcleo de ligas alumínio-urânio*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, fev. 1968 (IEA 156).
- 11 IERVOLINO J. R. & CINTRA S. H. L. *Influência de ligas Al-Mg na obtenção de elementos combustíveis com núcleo de ligas Al-U-Si*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, maio 1971 (IEA 237).
- 12 JONCKHEERE, E. et alii. *Gainage par coulée et fabrication de plaques triplex à base d'un alliage Al-U*. In INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. *Fuel element fabrication, with special emphasis on cladding materials proceedings in Vienna, May 10-13, 1960*. London, Academic Press, 1961, p. 343-71.

14

- 13 MEESTER, P Fuel location homogeneity and amount in flat and tubular configurations In INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Vienna *Non-destructive testing in nuclear technology proceedings held in Bucharest 17-21 May 1965* Vienna, 1965 v 2, p 413-38
- 14 QUADROS, N F Propriedades mecânicas de ligas Al-U e de alumínio comercialmente puro a várias temperaturas [Trabalho apresentado ao 30º congresso anual da ABM, Rio de Janeiro, julho 1 1975]
- 15 _____ et alii Estudo das ligas Al-U 1 técnicas experimentais para microscopia ótica e eletrônica *Revta bras Tech* São Paulo, 2(Supl 1) 506-43 1974
- 16 SOUZA SANTOS T D et alii *Características de placas delgadas para elementos combustíveis contendo dispersão de U₃O₈-Al* São Paulo Instituto de Energia Atômica, dez 1966 (IEA 134)
- 17 _____ et alii Developments in fuel fabrication for research reactors in Brazil In UNITED NATIONS New York *Proceedings of the third international conference on the peaceful uses of atomic energy held in Geneva 31 August-9 September 1964 V 10 Nuclear fuels 1 Fabrication and reprocessing* New York 1965 p 26-31
- 18 _____ et alii *Estudo experimental de fabricação de elementos combustíveis planos dotados de múltiplos cermetos* São Paulo Instituto de Energia Atômica, jun 1968 (IEA 162)
- 19 _____ et alii Experimental studies on the fabrication of thin fuel plates with U₃O₈-Al cermet In UNITED NATIONS New York *Proceedings of the third international conference on the peaceful uses of atomic energy held in Geneva 31 August-9 September 1964 V 10 Nuclear fuels 1 Fabrication and reprocessing* New York, 1965 p 32-7
- 20 _____ et alii *Fabricação de elementos combustíveis para o Reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear* São Paulo Instituto de Energia Atômica maio, 1965 (IEA 95)
- 21 _____ et alii *Principais características metalúrgicas dos elementos combustíveis produzidos para o Reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear* São Paulo Instituto de Energia Atômica, dez 1965 (IEA 112)
- 22 SOUZA SANTOS T D *Redução de U₃O₈ em pó por alumínio líquido* São Paulo, Instituto de Energia Atômica dez 1970 (IEA 266)
- 23 THURBER W C & BEAUER R J Silicon modified uranium aluminum alloys for foreign reactor applications *Am Inst Mining Met Petrol Engrs Inst Metals Div Spec Rept Ser* 5(7) 57-62, 1968