

ELETROFORMAÇÃO DE ESTRUTURA ACELERADORA

C.Fuhrmann, B.M.Verdelli Romão,
C.R.S.Stopa, M.A.R.Franco e V.A.Serrão

Divisão de Física Experimental
Instituto de Estudos Avançados
Centro Técnico Aeroespacial
Caixa Postal 6044
12231-970 - São José dos Campos - SP - Brasil

RESUMO

A técnica de eletroformação foi empregada com sucesso na construção da primeira estrutura do acelerador linear de elétrons. O procedimento consiste em depositar, por processo eletroquímico, uma camada de cobre sobre a superfície lateral cilíndrica da estrutura aceleradora, constituída por um empilhamento de cavidades de cobre OFHC.

A eletroformação é realizada com a estrutura em movimento de rotação constante e o depósito se processa a uma taxa de aproximadamente 0,78 mm/dia; foi depositada uma camada com espessura média 4,1 mm.

Testes preliminares de alto vácuo, realizados após a eletroformação, revelaram boa estanqueidade da secção. Os ensaios com radiofrequência mostraram bom desempenho da estrutura, tendo sido mantidas inalteradas as características físicas da mesma.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de brasagem é muito utilizada na fabricação de estruturas destinadas a aceleradores lineares de partículas. Entretanto, devido às dimensões típicas desse tipo de estrutura (secções cilíndricas cujos comprimentos variam, em geral, de 2 a 6 metros) são necessários fornos especiais (à vácuo e alta temperatura), de grandes dimensões, extremamente caros.

Processo alternativo para fabricação de estruturas aceleradoras é a técnica de eletroformação (eletrodeposição) [1,2,3]. Fundamentalmente, o experimento consiste em depositar, por processo eletroquímico, uma camada de cobre sobre a superfície lateral cilíndrica da estrutura, constituída por um empilhamento de cavidades de cobre. Uma vantagem importante desse método é não exigir, em princípio, a regulação em frequência da secção após o processo - a eletroformação é efetuada a

temperatura ambiente eliminando, dessa forma, operações a altas temperaturas, típicas de procedimentos de brasagem, que ocasionam alteração nas dimensões das cavidades [4].

Para confecção da primeira estrutura do acelerador linear de elétrons, atualmente em construção no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) [5], foi escolhida a técnica de eletroformação [6]. O procedimento foi nacionalizado nos laboratórios do Instituto a partir da década de 80, tendo sido utilizado também na confecção de outros dispositivos do acelerador [7].

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A secção aceleradora é constituída por um empilhamento de cavidades cilíndricas, formadas por anéis e iris fabricados em cobre OFHC (Oxygen Free High Conductivity), conforme mostrado no esquema da figura 1. As dimensões da estrutura foram calculadas segundo procedimento teórico previamente desenvolvido [8] e cada peça usinada em torno de alta precisão, onde é obtido um acabamento superficial espolhado, requisito importante para o desempenho do acelerador.

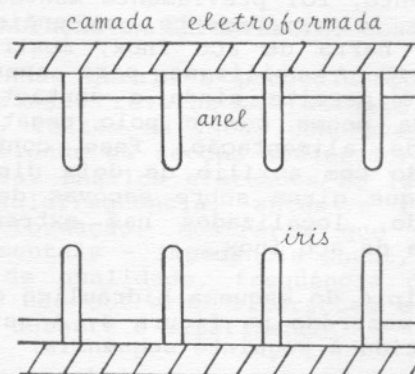


Figura 1 - Desenho da estrutura aceleradora, evidenciando a camada de cobre eletroformada.

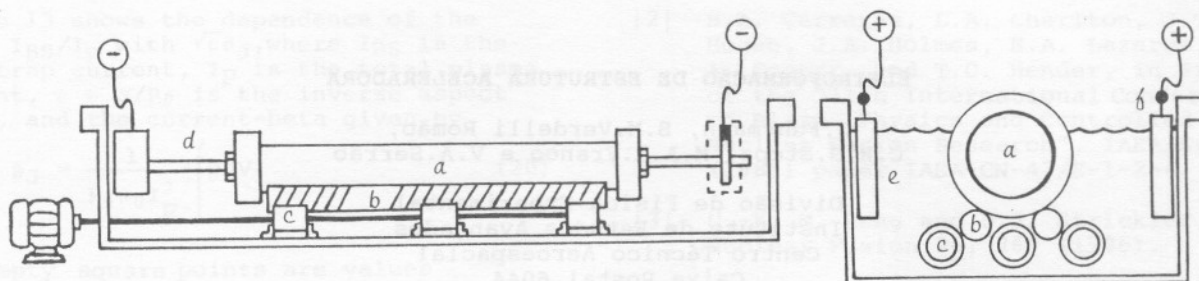


Figura 2 - Detalhes mecânicos do sistema de eletroformação: (a) estrutura aceleradora; (b) tubo de aço plastificado; (c) rolete; (d) barra de aço inox; (e) eletrodo; (f) barra de cobre.

Em linhas gerais, o procedimento para eletroformação prevê a submersão da estrutura em uma sequência de três banhos, sendo os dois primeiros destinados à preparação da superfície que receberá o depósito de cobre. Esse depósito é efetuado em um terceiro banho, constituído de uma solução ácida de sulfato de cobre, onde são colocados eletrodos de cobre eletrolítico. Utilizando-se uma fonte de alimentação elétrica é estabelecida uma tensão contínua entre a estrutura e os eletrodos de cobre produzindo, assim, uma corrente elétrica que provoca a migração de íons de cobre dos eletrodos para a superfície da estrutura.

O esquema geral da parte mecânica do sistema de eletroformação é mostrado na figura 2. A fim de promover o necessário isolamento elétrico das peças metálicas de suporte, a estrutura é depositada sobre dois tubos de aço inox revestidos com PVC. O conjunto é colocado em rotação por meio de nove roletes de aço inox, seis dos quais acoplados por eixos a um grupo moto-redutor. A alimentação elétrica do moto-redutor é regulada de modo a produzir a rotação conveniente.

A estrutura aceleradora, de 2 metros de comprimento, foi previamente montada juntando-se, alternadamente, os anéis e as iras. A barra de aço inox, mostrada na figura 2, é utilizada para aperto da secção e permite ainda o contacto elétrico da mesma com o polo negativo da fonte de alimentação. Esse contato é realizado com auxílio de dois discos de cobre, que giram sobre escovas de cobre grafitado, localizados nas extremidades da barra de aço inox.

O princípio do esquema hidráulico do sistema é mostrado na figura 3. A estrutura é submetida à seguinte sequência:

a) **imersão em solução desengraxante:** solução, em água comum, de desengraxante alcalino para cobre ROCKLEEN-123-65 [9] a 70 g/litro e temperatura de aproximadamente 55°C, durante 15 minutos;

b) **enxague** com água comum, por 10 minutos;

c) **imersão em solução desoxidante:** solução, em água comum, de 100 ml/litro de H_2SO_4 , 80 ml/litro de água oxigenada e 37 ml/litro de ETCH CLEANER [9];

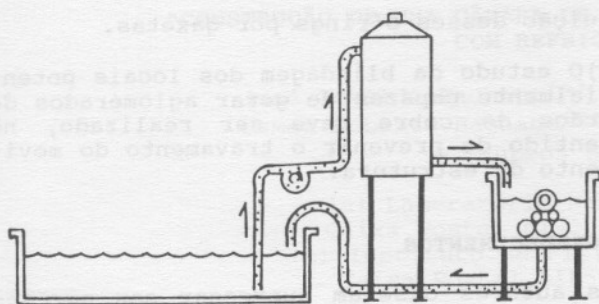
d) **enxague** com água destilada, por 3 minutos;

e) **imersão em solução de eletroformação:** solução, em água destilada, de 225 g/litro de $CuSO_4$, 75 g/litro de H_2SO_4 , 40 a 50 mg/litro de $Cl^- (NaCl)$ e 5 ml/litro de solução abrillantadora UBAC [9].

Ao fim de cada etapa de imersão, a solução correspondente é drenada do tanque principal para o tanque intermediário correspondente, a partir do qual é bombeada para o reservatório adequado. Na eventual interrupção acidental do processo de eletroformação, a sequência deve ser reiniciada a partir do banho desoxidante.

No tanque principal opera um circuito de recirculação, filtragem e refrigeração da solução de eletroformação: sob uma das extremidades do tanque uma bomba faz a sucção do líquido, que é reintroduzido no tanque, em dois pontos, na extremidade oposta. Em cada um dos ramos do circuito é colocado um filtro e um trocador de calor; no circuito secundário dos trocadores circula água comum, cujo fluxo é controlado manualmente em função da temperatura da solução.

Devido às características da solução (contém ácido sulfúrico), apenas peças de aço inox e PVC são permitidas no interior do tanque principal. Além disso, para que as peças metálicas, que estejam em contacto elétrico com a estrutura, não recebam depósito de cobre, elas devem ser blindadas por capas isolantes. As vedações das peças fixas são realizadas por o-rings de viton; os rolamentos integrantes dos roletes do tanque são vedados por capas de PVC e o-rings de viton. Toda tubulação é de PVC.



tanques de polipropileno

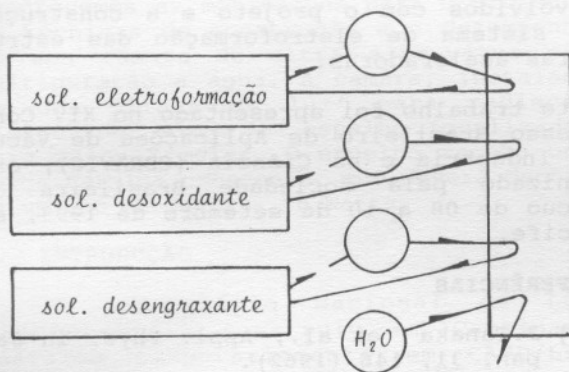


Figura 3 - Esquema hidráulico, mostrando a disposição do tanque principal (à direita), dos reservatórios cilíndricos (ao centro) e dos tanques intermediários (à esquerda).

Em virtude da disposição da estrutura aceleradora e dos cilindros de apoio no interior do tanque principal (figura 2), a área visível para eletroformação é de 7250 cm^2 [6]. Por outro lado, os eletrodos de cobre eletrolítico tem formato cilíndrico, de secção reta aproximadamente elíptica, apresentando uma área de projeção de cerca de 170 cm^2 . Adotando-se uma relação de 1:1 entre a área total dos eletrodos e a área visível da estrutura para eletroformação, calculou-se em 42 o número de eletrodos necessários. São, então, dispostos 21 eletrodos de cada lado da secção, regularmente espaçados ao longo do tanque principal. Os eletrodos são suspensos e mantidos no potencial elétrico adequado por meio de ganchos metálicos presos a duas barras de cobre (vide figura 2), dispostas paralelamente ao eixo da secção e localizadas em ambos os lados da estrutura, junto às paredes longitudinais do tanque principal. O conjunto é conectado ao polo positivo da fonte de alimentação. É importante mencionar que todos os eletrodos são envol-

vidos em sacos tecidos com fios plásticos, com o intuito de evitar que a lama anódica, liberada à medida que o eletrodo é consumido, seja dissolvida na solução.

A densidade de corrente característica ao processo de eletroformação é de $0,05 \text{ A/cm}^2$. Uma vez que a área a ser eletroformada é de 7250 cm^2 , calcula-se em aproximadamente 360 A a corrente necessária, que é suprida por uma fonte de corrente contínua de alta estabilidade.

3. ELETROFORMAÇÃO DA ESTRUTURA

Foram necessários cerca de 600 litros de solução de eletroformação. Durante a operação, a solução foi titulada, em média, uma vez por dia. O circuito de recirculação-filtragem-refrigeração da solução foi mantido em operação ininterrupta.

A temperatura foi frequentemente monitorada, tendo permanecido constante, em torno de 29°C , durante o experimento.

A alimentação do moto redutor foi regulada de maneira que a rotação da estrutura permanecesse entre 10 e 15 rpm.

Ao longo de todo o processo a corrente foi mantida constante, em 360 A . A tensão da fonte, entretanto, oscilou lentamente entre $4,0$ e $5,5 \text{ V}$. A corrente nos eletrodos foi medida com auxílio de um voltímetro acoplado a um medidor de corrente tipo toróide. Como regra geral, na maioria dos eletrodos foi medida uma corrente próxima à média: $8,6 \text{ A}$.

Ao término da eletroformação, que durou 126 horas ($5,25$ dias), o diâmetro da estrutura foi medido em $228,2 \pm 0,6 \text{ mm}$. Sendo $220,0 \text{ mm}$ o diâmetro inicial, obtém-se o valor de $0,78 \text{ mm/dia}$ para a taxa média de depósito.

4. AVALIAÇÃO DA EXPERIÊNCIA: CONCLUSÕES

Em linhas gerais o procedimento de eletroformação revelou-se bastante satisfatório. Testes de vácuo comprovaram a estanqueidade da secção aceleradora eletroformada. Ensaio efetuados no laboratório de radiofrequência, antes e depois da eletroformação, mostraram que grandezas fundamentais - impedância shunt, coeficiente de qualidade, frequência de operação - não sofreram alterações significativas durante o experimento.

É fundamental salientar, entretanto, a ocorrência de um certo número de problemas, alguns deles inerentes ao processo de eletroformação e outros ligados à concepção mecânica do sistema utilizado. Com

relação aos primeiros, são dignos de nota os aglomerados irregulares de cobre que crescem em determinadas regiões do depósito, principalmente nas extremidades da estrutura. Esses aglomerados devem ser retirados manualmente, pois alguns podem, ao se desprender, alojar-se entre cilindros, roletes e estrutura, provocando travamento e parada do movimento. É importante também mencionar o aparecimento, logo após o início do processo, de pequenas irregularidades (grãos de cobre com cerca de um milímetro de diâmetro e poucos décimos de milímetro de altura) localizadas nas extremidades e na região central da superfície lateral da estrutura, locais estes próximos aos roletes de aço inox (vide figura 2). O problema foi atenuado com a adição de solução abrillantadora UBAC (0,8 ml/litro), com a raspagem manual das asperidades e, principalmente, com a remoção de alguns eletrodos das regiões próximas às irregularidades.

Com referência aos problemas mecânicos, foi constatado o surgimento, no interior do tanque, de pequenas partículas de PVC provenientes do desgaste provocado pelo atrito entre a estrutura e os cilindros de aço inox revestidos com PVC (figura 2). O problema foi minimizado com a acomodação entre as partes, após o condicionamento do sistema, conseguido por rotação durante várias horas, antes do início do experimento. Foi ainda observado o vazamento de solução de eletroformação para o interior das caixas de alimentação elétrica e para o exterior do tanque. Em ambos os casos, os vazamentos ocorreram nos locais onde os eixos são vedados por o-rings de viton em operação dinâmica.

Apesar do êxito da experiência de eletroformação, algumas correções devem ser efetuadas no sistema visando nova operação:

a) Deve ser evitada ao máximo a utilização de peças metálicas imersas na solução. É sugerido o estudo visando plastificação dos nove roletes de aço inox, bem como dos respectivos eixos de acoplamento.

b) Deve ser estudada a substituição do revestimento de PVC dos cilindros de aço inox por outro isolante mais resistente ao atrito, para evitar o desgaste dos mesmos e a conseqüente formação de resíduos.

c) Todas as vedações utilizando o-rings ou cordões de viton em condição estática deram bons resultados. Já as vedações dinâmicas provocaram vazamentos (caixa de alimentação, rolamentos dos roletes, eixos motores). É indispensável a substi-

tuição desses o-rings por gaxetas.

d) O estudo da blindagem dos locais potencialmente capazes de gerar aglomerados de grãos de cobre deve ser realizado, no sentido de prevenir o travamento do movimento da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seu agradecimento a todo o pessoal da Divisão de Física Experimental do IEAV pelo auxílio prestado durante a operação ininterrupta (24 horas/dia) do arranjo e aos funcionários da Divisão de Suporte Tecnológico envolvidos com o projeto e a construção do sistema de eletroformação das estruturas aceleradoras.

Este trabalho foi apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência (CBRAVIC), organizado pela Sociedade Brasileira de Vácuo de 08 a 10 de setembro de 1993, em Recife.

REFERÊNCIAS

- [1] J.Tanaka et al., Appl. Phys. in Japan, **31**, 146 (1962).
- [2] J.Tanaka, T.Nishikawa and H.Baba, Part.Accel., vol.2, p.235-241 (1971).
- [3] W.Blum and G.B.Hogaboom, "Principles of electroplating and electroforming", Mc Graw Hill Book Co. (1942).
- [4] J.Tanaka, "The status of accelerator development in Japan", 1976 Proton Lin.Acc.Conf., Chalk River, Ontario, Canada, September 14-17 (1976)27.
- [5] C.R.S.Stopa et al., "The IEAV electron linear accelerator: a progress report", CTA/IEAV/FEX, Mem. Téc. No. 069 (25 mar 92)458.
- [6] C.Fuhrmann et al., "Eletroformação da estrutura aceleradora", CTA/IEAV/FEX, Mem. Téc. No. 071 (29 jan 93)477.
- [7] B.M.Verdelli Romão, "Processo para eletroformação de guias de onda", CTA/IEAV/FEX, Relatório Interno RI-FEX-08/87(1987).
- [8] C.Fuhrmann e V.A.Serrão, Rev. Bras. Aplic. Vácuo, vol.11, No.1 (1992)142.
- [9] ROCKEEN-123-65, produto da ROHCO Brasileira Ind. e Com., SP. ETCH CLEANER, produto da BERLIMED, Divisão de Galvanotécnica, SP. UBAC, produto da UDYLLITE Corp., Detroit, Michigan, USA.