

PAPEL DA METALURGIA NUCLEAR NA ENGENHARIA DE REATORES  
Heliton Motta Haydt

1. Introdução

Certas restrições, devidas aos materiais, impõem limites nos programas dos campos de engenharia, como aqueles que necessitam de alta resistência, ou são realizados a temperaturas elevadas.

Na escolha de materiais, para qualquer aplicação específica, precisamos conhecer as propriedades mecânicas e físicas correspondentes.

Assim,

a resistência a tração é importante para partes estruturais;

a resistência a corrosão, para a utilização em meios agressivos;

a ductilidade, para efeito de facilidade de fabricação e

e aparência, para motivo de decoração.

Existem milhares de materiais, incluindo metais e ligas. A escolha no entanto, fica reduzida a um pequeno número devido ao custo ou à disponibilidade, do qual um é finalmente selecionado.

O projeto de instalação do Laboratório de Metalurgia para o projeto Manhattam escondia um programa que era a construção de um reator nuclear. O número de engenheiros metalurgistas, igual ao número de físicos, mostra a importância dos problemas materiais do primeiro reator CPI em Chicago, EUA.

Nas aplicações nucleares, há exigências adicionais que reduzem às vezes, a um único material, não permitindo outra escolha; outras vezes, não há nenhum, requerendo então trabalhos de pesquisa. Isto porque o projeto básico de um reator tem de ser considerado sob vários aspectos técnicos simultaneamente e onde são exigidas e estudadas, além das propriedades mecânicas

e físicas, suas características nucleares. Interpretando estas dificuldades chegou a dizer o Dr. Hilberry, um dos primeiros diretores do Laboratório de Argonne, nome atual do citado Laboratório de Metalurgia:

"Um tipo de reator, no papel, permanece um reator de papel até que os metalurgistas nos digam se há materiais para construí-lo".

Vejamos rapidamente alguns aspectos que tornam difícil a escolha de materiais na engenharia nuclear.

Os materiais para elementos combustíveis e componentes de reatores são empregados como:

- a) combustível
- b) moderador
- c) refletor
- d) de controle
- e) de resfriamento
- f) de blindagem
- g) de revestimento e estrutural

## 2. Influência de Seção de Choque de Absorção de Neutrons

Comecemos estas características nucleares pela Seção de Choque de Absorção de Neutrons que é a medida da capacidade de um núcleo de um elemento absorver neutrons. Ela é expressa em unidades de área "barn" -  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>. Num reator nuclear, há necessidade de economia de neutrons, pelo que devemos evitar materiais absorvedores ou capturadores de neutrons que causam interferência na propagação da cadeia de fissão nuclear, com excessão, no entanto, dos materiais combustíveis, férteis ou de controle quando então passa a ser exatamente uma característica nuclear importante. O zircônio, por exemplo, é importante como material de revestimento de elementos combustíveis de reatores de potência, devido principalmente a sua baixa seção de choque de absorção de neutrons e a sua boa resistência à cor

rosão a temperaturas elevadas, aliadas a uma boa resistência mecânica. O papel, que o zircônio tem desempenhado com o desenvolvimento da energia nuclear, alterou por completo a sua posição entre os metais-não-ferrosos. Assim, o zircônio que tinha limitado emprego até 1945, por causa de seu custo, passou a ser produzido industrialmente devido as suas propriedades nucleares convenientes, a maior parte de sua produção sendo usada em aplicações nos reatores nucleares. Em 1982, o consumo de zircônio metálico totalizou 4500 t dos quais 80% para uso em elementos combustíveis e tubos de pressão em reatores nucleares de potência. Tendo em vista esta característica nuclear, a 1 kg de ferro utilizado corresponde a possibilidade de usar 15 kg de zircônio; a 1 kg de aço inoxidável, de 20 kg de zircônio, enquanto a relação para 1 kg de níquel é de 30 kg de zircônio. A importância da seção de choque pode assim favorecer um material mais do que seu custo. Para as aplicações nucleares, o hafnio, que está sempre presente nos minérios de zircônio, deve ser removido, já que tem alta seção de choque de absorção de neutrons e é usado então como material de controle nos reatores. Também algumas das terras raras, como o gadolínio, o samário, o európio e o disprósio, por causa da alta seção de choque de absorção para neutrons térmicos, são utilizados em várias aplicações nucleares, sendo que o samário, o európio e o disprósio têm sido utilizados em reatores rápidos regenerativos. Já o gadolínio, como óxido, pode ser usado como veneno queimável em combustível de urânio, em reatores de água sob pressão ou a água fervente. O gadolínio tem a seção de choque de absorção de neutrons térmicos mais alta do que qualquer outro elemento, de cerca de 46.000 barns por átomo. Quando misturado com urânio fissionável, ele estende o ciclo, reduz o consumo de urânio e aumenta o rendimento da energia produzida.

### 3. Os efeitos de Radiação

Em segundo lugar, vejamos os efeitos de radiação que tornam materiais servíveis sob condições normais, não satisfatórios quando expostos a partículas e radiações. Por esse motivo pode acontecer:

- 1) Uma corrosão acelerada ou induzida;
- 2) Os materiais orgânicos, úteis como agentes de resfriamento, se polimerizarem;
- 3) Metais e ligas sofrerem encruamento por radiações de neutrons a temperaturas relativamente baixas;
- 4) Núcleos de elementos sujeitos a fluxo de neutrons, devido à radiação induzida, absorverem neutrons e converterem-se em isótopos que podem ser radioativos e decair com a emissão de várias espécies de partículas e de radiações. É o caso por exemplo de materiais de resfriamento, que se tornam radioativos, como o sódio,



que necessita de proteção adicional para o sistema de resfriamento.

Para reduzir a radioatividade no prédio do reator, especialmente durante os períodos de manutenção, operações de recarga e revisão do reator, faz-se necessário um controle adequado de cobalto e tantaló, exigindo-se teores menores do que 800 ppm e até 200 ppm desses elementos nas ligas empregadas.

As considerações nucleares apresentam portanto severas restrições à escolha de material para reatores nucleares. Temos de excluir o cobalto, mesmo em reatores de temperatura elevada, embora as ligas de cobalto sejam superiores em aplicações como partes de motores a jato, pela alta resistência a tração em temperaturas elevadas.

5. Pode também acontecer a transmutação, que é um efeito especial de irradiação de neutrons; vejamos o exemplo do alumínio no reator:



Assim, o alumínio sob um fluxo da ordem de  $10^{15}$  neutrons/cm<sup>2</sup>. seg. em 20 anos, passará a conter 14% de silício; isto pode até não ser indesejável e por isso tem sido utilizado principalmente nos reatores de pesquisas.

Pode ainda acontecer:

6. Aumento de volume do berílio, devido ao hélio despreendido por reação ( $n, \alpha$ ), razão porque os metalurgistas renunciaram em 1962 a utilizá-lo no reator avançado AGR. Realmente, na década de cinquenta e princípio da década de sessenta, havia um grande otimismo quanto à combinação extraordinária das propriedades do berílio - "sua condutividade térmica, boas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas para um elemento leve e alto ponto de fusão faziam-no especialmente atraente para reatores a alta temperatura".

Suas características nucleares faziam-no um promissor moderador e refletor.

No entanto, passados mais de vinte anos, verificamos que em vez de tubos de revestimento de elementos combustíveis a base de berílio ou suas ligas, são usadas as ligas chamadas de Zircaloy, a base de zircônio.

7. Finalmente, acontece a grafita ser instável dimensionalmente e o urânio sofrer variações de dimensões quando exposto ao fluxo de neutrons. Devido à importância do urânio como material para elementos combustíveis, vamos nos deter aqui um pouco mais. O metal urânio existe em três formas alótropicas;

a- na fase  $\alpha$ , em que se cristaliza no sistema ortorrômbico de base centrada e é estável até  $663^{\circ}\text{C}$ .

b- na fase  $\beta$ , em que tem uma estrutura quadrática e se mantém entre  $663$  e  $779^{\circ}\text{C}$ ; e

c- na fase  $\gamma$ , em que é cúbico de corpo centrado e existe desde  $770^{\circ}\text{C}$  até o ponto de fusão a  $1130^{\circ}\text{C}$ .

O cristal  $\alpha$  é anisotrópico (exibe diferentes valores de uma propriedade em direções diferentes). Assim, quando aquecido, ele se dilata em duas direções e se contrai na terceira direção. Embora a fase  $\beta$  seja também, provavelmente, anisotrópica, a fase  $\gamma$  é isotrópica.

Quando o urânio na fase  $\alpha$  é deformado por laminação, extrusão ou forjamento rotativo, os cristais se orientam em direções preferenciais. Esta orientação preferencial torna-se mais pronunciada com o aumento da severidade do trabalho.

Devido à anisotropia do urânio  $\alpha$ , esta orientação preferencial provoca variações:

- a- dimensionais, quando exposto à radiação ou su jeito à alternâncias de temperaturas (isto é, ciclagem térmica)
- b- nas propriedades mecânicas.

Do ponto de vista metalurgico, o urânio é um mau elemento porque, no caso das variações dimensionais provocadas pela orientação preferencial, teríamos monocristais pequenos e gros sos de urânio, alterando-se para monocristais compridos e finos depois da alternância de temperatura ou de efeitos de radiação. Isto pode ser um fenômeno interessante com monocristais, mas é catastrófico em se tratando de material policristalino, princi palmente porque o material de revestimento necessário não acom panha as variações dimensionais correspondentes.

A estrutura ideal deverá ser, pois, completamente ao acaso em orientação e de tamanho de grão extremamente fino. Isto é conseguido por um tratamento térmico adequado ou através de uma liga muito diminuta ou, mais propriamente, com o uso próprio de impurezas como Fe(300 ppm), Al(400 a 1200 ppm), C(600 ppm) e Si(50 a 75 ppm), que podem ajudar no tratamento térmico.

Apesar destas desvantagens, muito desenvolvimento foi feito com o urânio não só metálico, como cerâmico, mas princi palmente com este último. A importância do emprego de compostos cerâmicos de urânio, como o  $UO_2$  por exemplo, é devida princi palmente aos seguintes fatores:

- a- estabilidade em temperaturas elevadas;
- b- grande resistência à ação dos meios líquidos ou gasosos que possam atingir o núcleo do ele mento combustível;
- c- bom comportamento sob radiação.

#### 4. Principais Propriedades Desejáveis

Quanto aos materiais usados para revestimento de combustível, para conter o moderador ou o fluido resfriador e para sustentar mecanicamente o núcleo, isto é, os chamados materiais estruturais, estes incluem metais, ligas e outros compostos.

As principais propriedades desejáveis dos materiais estruturais são:

- 1) Ponto de fusão elevadas
- 2) Resistência mecânica alta
- 3) Resistência a corrosão no meio em que for utilizado
- 4) Condutibilidade térmica e propriedades de condução de calor elevadas
- 5) Resistência aos esforços térmicos
- 6) Resistência a danos de irradiação
- 7) Inativáveis
- 8) Capazes de reter produtos de fissão
- 9) Baixa seção de choque para absorção de nêutrons em reatores térmicos.
- 10) Facilidade de fabricação
- 11) Relativa abundância e baixo custo.

#### 5. Conceito de Pureza Nuclear

Enfim, tudo deve ser levado em consideração. O uso de materiais em reatores nos deu novo conceito de pureza: toleramos quantidades apreciáveis de certas impurezas mas não podemos tolerar quantidades mínimas de outras. Daí a noção de pureza nuclear. A exigência de materiais de pureza para reatores ou "Reator Grade" significa utilizar materiais isentos de impurezas de alta seção de choque. Materiais, semelhantes quimicamente, se apresentam associados frequentemente nos seus minérios, tendo seções de choque de absorção de nêutrons bem diferentes. Sua sepa

ração se torna necessária e as dificuldades têm de ser superadas. É o caso por exemplo, já citado, do zircônio que é encontrado com háfnio, de seção de choque muito elevada e que precisa ser removido, como vimos acima.

## 6. Conclusão

Até o presente estado de desenvolvimento, pode ser dito que os problemas físicos básicos na construção de reatores são considerados como largamente resolvidos. Isto não é válido, entretanto, para a tecnologia de reatores relacionada com problemas materiais. É, certamente, óbvio que as propriedades materiais determinam em muitos casos a temperatura máxima obtida no reator e, portanto, sua eficiência.

Vimos que os materiais usados na construção de um reator devem preencher certas condições básicas, principalmente quanto à pureza do preparo, fabricação, propriedades físicas e tecnologias, como também o custo. Mas, certamente, as propriedades nucleares representam um fator decisivo para a escolha dos materiais de reatores.