



Estudo de Caso Industrial: Materiais para Reatores Nucleares

Mauricio Dwek¹, Claes Fredriksson¹, Camila Nogueira², e
Cesar Roberto de Farias Azevedo²

¹Ansys Materials Education Division, Cambridge (UK)

²Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil

Publicado originalmente em: 2020

Esta versão: 2021

Materiais para Reatores Nucleares

A energia nuclear ainda é uma alternativa relevante para suprir a demanda energética de muitos países, principalmente aqueles cujo objetivo é utilizar fontes não fósseis e com baixa emissão de gases do efeito estufa. Devido às altas temperaturas de funcionamento e à constante exposição à radiação de processos nucleares, os materiais utilizados para essa aplicação devem atender a critérios específicos de desempenho. Estes critérios são essenciais para a eficiência e segurança operacional de reatores nucleares.

O Reator de Água Pressurizada (PWR) é, dentre os reatores de água leve, o mais tradicional. Seu núcleo consiste em cerca de 200 elementos combustíveis contendo 264 varetas combustíveis cada. As varetas envolvem as pastilhas cerâmicas de combustível, usualmente feitas de dióxido de urânio enriquecido (UO_2). Essas pastilhas estão envoltas e revestidas pelas varetas combustíveis para evitar atritos e reações não desejadas. Esse revestimento não deve interferir na transferência de calor entre as pastilhas combustíveis e o fluido refrigerante, deve prevenir vazamentos, deve conter produtos de fissão radioativos e deve resistir à corrosão. Os aços inoxidáveis austeníticos foram utilizados para essa aplicação até 1960, quando as ligas de zircônio se difundiram no setor nuclear devido à baixíssima seção de choque de absorção de nêutrons.

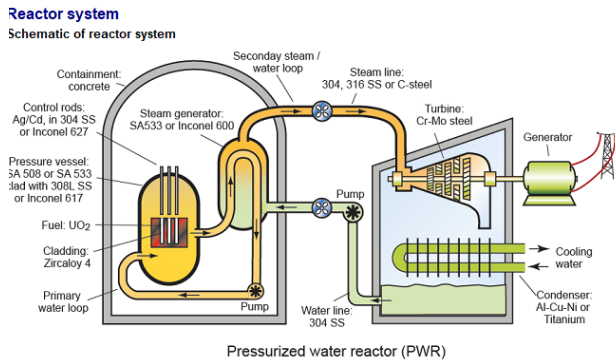


Figura 1: Funcionamento de um PWR

Dentre os muitos modelos de reatores criados desde o PWR, um dos mais promissores é o Reator de Leito de Esferas (PBR), um reator de temperatura altíssima cuja vantagem se dá pela possibilidade de inspecionar e remover o combustível nuclear sem desligar o reator.

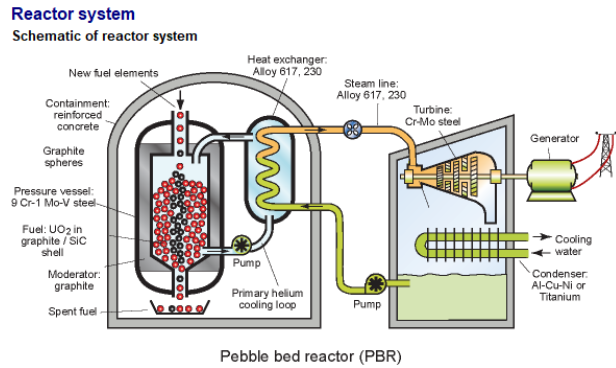


Figura 2: Funcionamento de um PBR

No PBR, as esferas que contêm o material físsil têm raio de 6cm com uma camada externa de grafite de 0,5cm. Já seu núcleo é composto de 10 a 15 mil microesferas combustíveis dispersas em uma matriz de grafite. As microesferas têm diâmetro de 0,9mm e são compostas por camadas de diferentes materiais (carbono pirolítico poroso e de alta densidade e carbeto de silício), criando um mini vaso de pressão e uma zona de retenção em torno do material físsil. Essas camadas devem manter suas propriedades em temperaturas superiores a 1500°C.

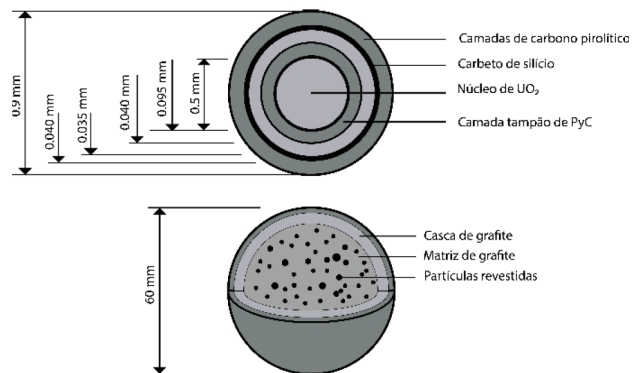


Figura 3: Estrutura e composição das esferas

Qual é o problema?

O principal mecanismo de falha de PWRs é a fretagem entre as grades de espaçamento e as varetas combustíveis, causada pelo fluxo turbulento do fluido refrigerante. Esse fenômeno gera vibrações estruturais que causam atrito e criam uma folga, permitindo movimento relativo entre as partes, que pode danificar o material e levar à falha da vareta combustível.

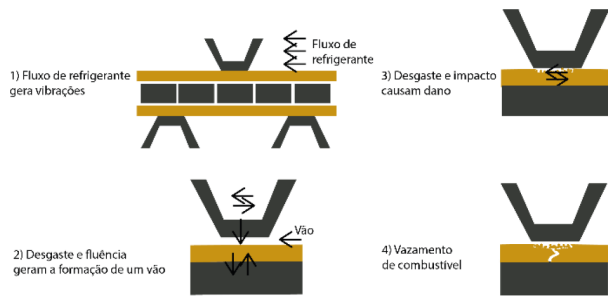


Figura 4: Mecanismo de fretagem entre a grade e a vareta

Nos reatores PBR, devido às temperaturas altíssimas de funcionamento e aos produtos da reação de fissão, são geradas tensões internas de tração e compressão no interior das microesferas. Essas tensões são responsáveis pelo principal mecanismo de falha dos PBRs, devido a trincas que se formam na camada de carbono pirolítico poroso e se propagam pelas outras camadas, consequentemente ocasionando a falha da camada de carbetos de silício e da microesfera como um todo.

As funções estruturais críticas de cada combustível nuclear são: proporcionar uma transferência de calor adequada, integridade e proteção com relação ao refrigerante (no caso do PWR), e agir como um vaso de pressão, retendo os produtos de fissão (para o PBR). Materiais para reatores nucleares precisam, portanto, apresentar propriedades bastante específicas quanto a: dureza; condutividade e coeficiente de expansão térmica; resistência química ao refrigerante, materiais e produtos físeis; resistência à fluência e limite de escoamento; seção de absorção de nêutrons, resistência à corrosão e à fluência de radiação. Esses requisitos são essenciais para atingir os dois objetivos principais dessa aplicação: segurança da operação e eficiência máxima do processo.

O que o EduPack pode fazer?

Atingir os objetivos discutidos até aqui requer a tradução dos requisitos de projeto em índices de mérito adequados. A eficiência do processo em ambos os reatores é proporcional à condutividade térmica do material do revestimento do combustível e da sua temperatura máxima de serviço, já que a máxima transferência de calor é almejada. Nós introduzimos aqui um indicador de desempenho que reflete essas grandezas de

maneira simplificada. Quanto à segurança de operação do reator, PWRs e PBRs têm índices diferentes. Nos PWRs, o revestimento precisa resistir à fretagem entre grade e vareta o que envolve dureza. Também deve apresentar limite de escoamento e tenacidade suficientes. E, no caso de superaquecimento, deve ter alta temperatura de fusão – todos fatores incluídos num segundo indicador de desempenho. As seguintes etapas *Limit* e *Tree* foram aplicadas:

- Elementos com baixa absorção de nêutrons (C, Si, Zr e carbetos)
- Excelente durabilidade na água
- Baixo coeficiente de expansão térmica (0-8 microns)
- Ponto de fusão > 1850°C

A Figura 5 mostra os indicadores de desempenho para PWRs:

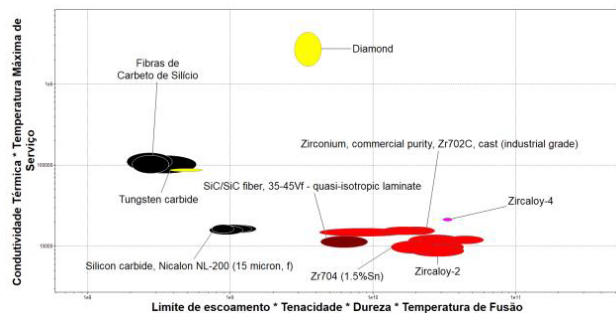


Figura 5: Materiais candidatos para PWRs

Ligas de Zircônio, fibras de carbetos de silício, diamante, carbetos de tungstênio e compósitos SiC/SiC têm o melhor desempenho.

No caso de PBRs, o revestimento age como um pequeno vaso de pressão e o seguinte índice de mérito deve ser maximizado para maximizar a segurança da operação:

$$M = K_{IC}^2 / \sigma_y$$

As etapas *Limit* e *Tree* aplicadas foram:

- Elementos com baixa absorção de nêutrons (C, Si, Zr e carbetos)
- Resistência ao choque térmico > 300°C
- Baixo coeficiente de expansão térmica (0-6 microns)
- Ponto de fusão > 2000°C

A maioria dos resultados envolve SiC, em forma pura ou como compósito, assim como o carbetos

de zircônio. O diamante também tem excelentes propriedades mas não seria prático do ponto de vista do processamento e do custo. A Figura 6 mostra a relação entre o primeiro índice de desempenho descrito acima e índice de mérito de segurança para PBRs.

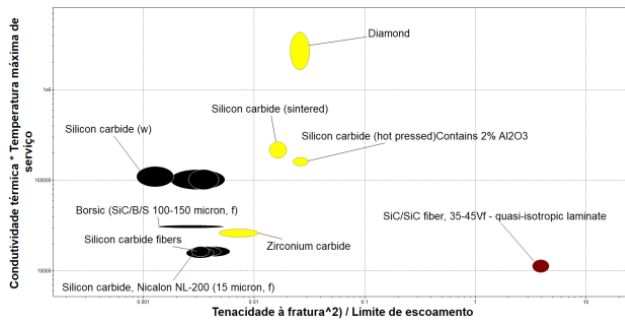


Figura 6: Materiais candidatos para PBRs

Base de dados Sustainability

A base de dados *Sustainability Level 3* tem dados adicionais que podem ser usados para investigar outros aspectos da geração de energia nuclear. A base *Elements* fornece propriedades nucleares como seção de choque de absorção de nêutrons, que pode ser plotada em função da temperatura de fusão para verificar os elementos que podem suportar os requisitos térmicos e não perturbar os nêutrons do reator. Usando uma etapa *Limit*, um máximo de 0,5 Barns pode ser aplicado à absorção de nêutrons e um mínimo de 500°C à temperatura de fusão, como mostrado na figura abaixo, confirmando que carbono, silício e zircônio são opções sensatas.

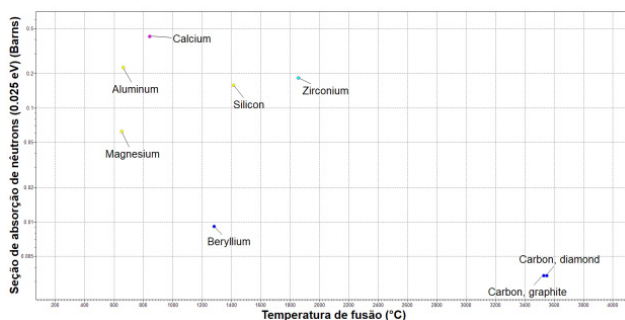


Figura 7: Elementos candidatos para aplicações nucleares

Há também outros exemplos de reatores nucleares na base *Power System – Nuclear*, com mais descrições dos reatores e detalhes acerca

do combustível, revestimento, refrigerante e temperatura de saída. No registro do PWR, o Zircaloy-4 é dado como material atualmente usado no revestimento, o que confirma nossos resultados. A base *Power System – Low carbon* pode ser explorada para comparar usinas de geração diferentes e discutir seus impactos e vantagens potenciais na composição da matriz energética de um país.

Verificação da realidade e conclusões

Esse estudo de caso foi inspirado no trabalho de Camila Nogueira do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP. Ele permitiu a exploração de materiais de reatores nucleares e suas propriedades, bem como a aplicação da metodologia de seleção de materiais a uma função e carregamento não cobertos pela ferramenta *Performance Index Finder* ou pelas tabelas de índices de mérito inclusas no software. Dada a confidencialidade sobre desenvolvimentos nesse setor, existe pouca informação disponível sobre novos materiais. No entanto, os resultados obtidos são coerentes com as atuais práticas industriais.

© 2021 ANSYS, Inc. All rights reserved.

Uso e Reprodução

O conteúdo usado nesse documento pode ser usado ou reproduzido para fins pedagógicos; qualquer uso comercial é estritamente proibido.

Informações sobre o documento

Este estudo de caso faz parte de um conjunto de recursos docentes para suporte ao ensino de materiais, processos e seleções racionais..

Ansys Education Resources

Para acessar mais recursos para o ensino superior, incluindo apresentações com notas de aula, exercícios com soluções, micro-projetos, exemplos da vida real e mais, visite www.ansys.com/education-resources.

ANSYS, Inc.
Southpointe
2600 Ansys Drive
Canonsburg, PA 15317
U.S.A.
724.746.3304
ansysinfo@ansys.com

If you've ever seen a rocket launch, flown on an airplane, driven a car, used a computer, touched a mobile device, crossed a bridge or put on wearable technology, chances are you've used a product where Ansys software played a critical role in its creation. Ansys is the global leader in engineering simulation. We help the world's most innovative companies deliver radically better products to their customers. By offering the best and broadest portfolio of engineering simulation software, we help them solve the most complex design challenges and engineer products limited only by imagination.

visit www.ansys.com for more information

Any and all ANSYS, Inc. brand, product, service and feature names, logos and slogans are registered trademarks or trademarks of ANSYS, Inc. or its subsidiaries in the United States or other countries. All other brand, product, service and feature names or trademarks are the property of their respective owners.

© 2021 ANSYS, Inc. All Rights Reserved.