

# A INFLUÊNCIA DA IRRADIAÇÃO NUCLEAR NAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS APLICADOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA\*

Camila Oliveira Baptista<sup>1</sup>

## Resumo

Neste trabalho, é apresentada uma introdução às radiações, suas interações com a matéria, ionização, suas consequências e seus benefícios para a humanidade e, principalmente seu envolvimento com a ciência dos materiais. Serão apresentadas as características dos materiais empregados nas instalações nucleares para obtenção da energia elétrica que são afetados e modificadas pela irradiação nuclear. Entre outros, este trabalho objetiva contribuir para que futuramente possam ser apresentados novos projetos nesta área tão ampla e importante, mas pouco conhecida.

**Palavras-chave:** Irradiação nuclear, características dos materiais, ciência dos materiais.

## THE INFLUENCE OF NUCLEAR IRRADIATION IN THE CHARACTERISTICS OF THE MATERIALS APPLIED IN THE GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY.

## Abstract

In this work, an introduction to radiation, its interactions with matter, ionization, its consequences and its benefits for humanity, and especially its involvement with the science of materials, is presented. It will be presented the characteristics of the materials used in the nuclear installations to obtain the electric energy that are affected and modified by nuclear irradiation. Among others, this work aims to contribute to the future presentation of new projects in this area as large and important, but little known.

**Keywords:** Nuclear irradiation, characteristics of the materials, materials science.

<sup>1</sup> *Doutoranda em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a utilização das radiações ionizantes é cada vez maior em diversas áreas como: médica, agrícola, industrial, petrolífera, etc. Por se tratar de um fenômeno crítico, e potencialmente perigoso, para ser corretamente utilizado, faz-se necessário um rigoroso controle da presença, da intensidade e energia destas radiações ionizantes assim como a contenção da radiação para o meio externo, bem como a classificação do elemento que está emitindo tais radiações e a seleção dos materiais e componentes de uma central nuclear.

A área de engenharia nuclear é, por natureza, multidisciplinar, contemplando projetos de praticamente todos os ramos da engenharia, particularmente da engenharia de materiais, no que diz respeito à especificação de materiais distintos para aplicações diversas sendo para a construção de estruturas e reatores assim como acessórios. Entretanto, percebemos uma falta de trabalhos e até mesmo de informação que visem mostrar ao aluno as diversas oportunidades de atuação nesta área, usando os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de engenharia.

Esse trabalho vem dar uma contribuição ao que aprendemos em nossa vida acadêmica e profissional ao longo dos anos, com aplicação específica na área de materiais.

Uma importante atenção é dada à parte teórica, visando inserir conhecimentos sobre as radiações ionizantes, suas aplicações, as interações com a matéria, tipos de detectores e, através da descrição dos componentes de um conjunto de detecção e medida de radiações, explicar os diferentes módulos que o compõem.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR

Os grandes benefícios da energia nuclear ainda são pouco divulgados. A cada dia, novas técnicas nucleares são desenvolvidas nos diversos campos da atividade humana, possibilitando a execução de tarefas impossíveis de serem realizadas pelos meios convencionais ou então realizando tarefas com maior eficácia que os meios ditos convencionais. A medicina, a geração de energia, a indústria, particularmente a farmacêutica, e a agricultura são as áreas mais beneficiadas. Neste trabalho iremos nos concentrar na geração de energia elétrica apenas.

#### Geração de Energia Elétrica

Os prótons têm a tendência de se repelirem, porque têm a mesma carga (positiva). Como eles estão juntos no núcleo, comprova-se a realização de um trabalho para manter essa estrutura, implicando, em consequência, na existência de energia no núcleo dos átomos com mais de uma partícula. A energia de ligação que mantém os prótons e nêutrons juntos no núcleo é a Energia Nuclear. Uma vez constatada a existência da energia nuclear, restava descobrir como utilizá-la. Uma das maneiras de utilizar a energia nuclear baseou-se na possibilidade de partir-se ou dividir-se o núcleo de um átomo “pesado”, isto é, com muitos prótons e nêutrons, com baixa energia de ligação por nucleon, em dois núcleos menores, através da penetração de um nêutron. Durante o processo de fissão nuclear (Figura 1) são criados núcleos instáveis, são liberados raios gama, outros nêutrons de fissão e os neutrinos. Os núcleos gerados chamados de fragmento de fissão são instáveis, chegam à

estabilidade por emissão de pósitrons ou elétrons e neste processo ocorre à liberação de calor [1].

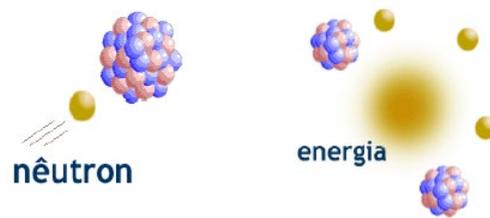


Figura 1– Fissão nuclear [2].

Os nêutrons de fissão atingem outros núcleos, sucessivamente (Figura 2), liberando muito calor. Tal processo é denominado reação de fissão nuclear em cadeia ou, simplesmente, reação em cadeia [1].

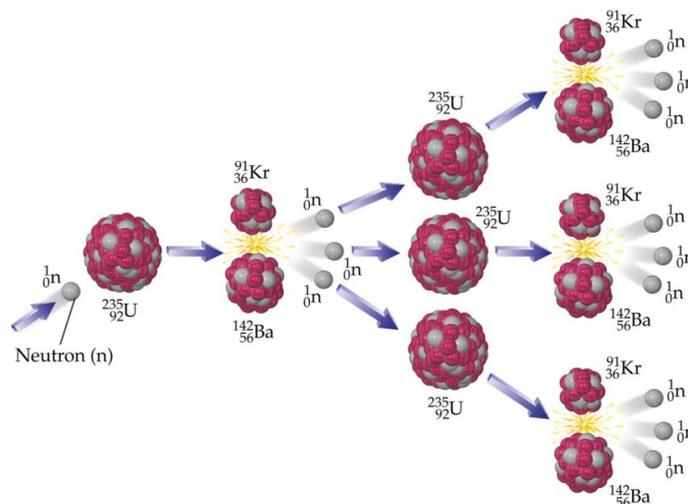


Figura 2– Reação em cadeia [3].

O reator nuclear é um equipamento onde se processa uma reação de fissão nuclear. Para um reator nuclear gerar energia elétrica (Figura 3), em vez de óleo combustível ou de carvão que são os combustíveis convencionais, usa-se “combustível” nuclear.

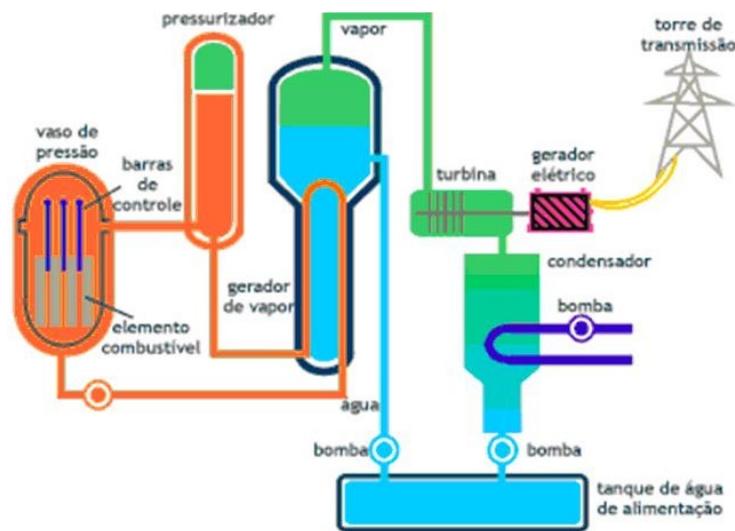


Figura 3– Central Termoelétrica [4].

O urânio-235 pode substituir o óleo ou o carvão para gerar calor. Não há diferença entre a energia gerada por uma fonte convencional (hidroelétrica ou térmica) e a energia elétrica gerada por um Reator Nuclear. A grande vantagem de uma Central Térmica Nuclear é a enorme quantidade de energia que pode ser gerada, ou seja, a potência gerada, para pouco material usado (o urânio) (Figura 4) [1].



Figura 4– Comparação entre combustíveis [5].

Geração de calor – A fissão dos átomos de urânio dentro das varetas do elemento combustível aquece a água que passa pelo reator a uma temperatura de 320 graus Celsius. Este processo é controlado. Para que não entre em ebulição – o que ocorreria normalmente aos 100 graus Celsius –, esta água é mantida sob uma pressão 157 vezes maior que a pressão atmosférica, mais de 15MPa. O gerador de vapor realiza uma troca de calor entre as águas deste primeiro circuito e a do circuito secundário, que são independentes entre si. Com essa troca de calor, a água do circuito secundário se transforma em vapor e movimenta a turbina – a uma velocidade de 1.800rpm – que, por sua vez, aciona o gerador elétrico. Esse vapor, depois de mover a turbina, passa por um condensador, onde é refrigerado pela água do mar, trazida por um terceiro circuito independente. A existência desses três circuitos impede o contato da água que passa pelo reator com as demais. Uma usina nuclear oferece elevado grau de proteção, pois funciona com sistemas de segurança redundantes e independentes (quando somente um é necessário).

## SELEÇÃO DE MATERIAIS

### Componentes e Materiais de um Reator Nuclear

Verificou-se no capítulo anterior que existem várias finalidades distintas. Englobando várias áreas de engenharia, procura-se projetar e especificar como devem ser os componentes e materiais que compõem o reator de forma a atender os objetivos propostos para sua utilização. No projeto de um reator nuclear a seleção dos materiais é uma etapa importante pois envolve o conhecimento de suas propriedades para todas as situações envolvidas e, principalmente, a mudança dessas propriedades num meio de alta radiação[6].

Propriedades Gerais e Especiais na Seleção de Materiais de Reatores Nucleares[6].

Os requisitos de propriedades materiais em reatores podem ser divididos em duas categorias principais[6]:

- Propriedades gerais ou considerações básicas;
- Propriedades especiais ou considerações particulares

As propriedades gerais ou considerações básicas são similares às propriedades de materiais convencionais na engenharia as quais são referidas na maioria dos projetos de engenharia. Essas propriedades são[6]

Resistência mecânica - é a habilidade de um elemento mecânico ou membro estrutural resistir às tensões impostas por carregamentos externos ou de serviço[6]..

Ductilidade - é a propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura[6].

Integridade estrutural - é a estabilidade mecânica da estrutura. Uma estrutura ou componente do reator pode manter sua integridade mecânica quando possui adequada resistência mecânica, ductilidade e alta estabilidade para resistir às combinações de carregamentos provenientes de condições severas de operação[6]..

Conformabilidade –é o grau de facilidade com que o material pode ser dobrado, prensado, estampado ou forjado sem prejuízos à sua integridade física sob vários aspectos: metalúrgicos, mecânicos, visuais e dimensionais [6].

Usinabilidade - É a facilidade com que o material pode ser cortado, torneado, fresado ou furado sem prejuízo de suas propriedades mecânicas. A usinabilidade é o indicador da capacidade dos materiais de se deixarem usinar, e o seu conhecimento é importante na escolha dos materiais a serem usinados na indústria[6].

Corrosão - a corrosão pode atacar todos os materiais metálicos em contato com fluídos corrosivos (refrigerantes líquidos e gasosos) e deve ser sempre levada em consideração para a seleção dos materiais[6].

Propriedades de transferência de calor - existem três modos gerais de transferência de calor: por condução; por convecção; por radiação. Os dois primeiros são da maior importância no projeto do reator e na seleção dos materiais. O calor gerado no combustível deve ser eficientemente removido no caso de reatores de potência. Os processos de remoção de calor, utilização e geração de potência nas plantas nucleares requerem boas propriedades de transferência de calor dos materiais empregados[6].

Estabilidade térmica - é uma importante característica para materiais que operam a temperaturas elevadas. Na maioria dos casos práticos a resistência mecânica, a integridade estrutural e a resistência à corrosão decrescem com aumento de temperatura. Particularmente a condutividade térmica do óxido de Urânio e Plutônio decresce drasticamente perto do ponto de fusão. Além disso, o refrigerante pode vaporizar e tornar o reator instável a altas temperaturas. A estabilidade térmica é essencial para a segurança do reator[6].

Compatibilidade - a compatibilidade dos materiais é um critério primordial que requer que todos os materiais e componentes em um dado sistema sejam compatíveis, ou seja, devem ser consistentes entre si e funcionar convenientemente[6].

Disponibilidade e custo - São considerações econômicas básicas nos projetos de engenharia e na seleção dos materiais. As vezes um determinado material pode ter excelentes propriedades mas se não há disponibilidade comercial e custo razoável de fabricação este torna-se difícil de ser utilizado[6].

As propriedades especiais requeridas para materiais nucleares resultam das fontes de radiação nuclear, ou irradiação, e das condições do sistema do reator. As propriedades dos materiais podem ter uma grande variação sob irradiação[6].

Propriedades neutrônicas - as propriedades neutrônicas consistem principalmente da forma de interação dos nêutrons com o material. A interação pode dar-se por fissão, captura e espalhamento. A medida da probabilidade da interação é denominada seção de choque. Cada elemento de um determinado material tem uma característica própria de seção de choque de absorção (captura ou fissão) e de espalhamento e a seleção do material deve compatibilizar esta característica com a função do material ou componente dentro do reator[6].

Radioatividade induzida - a absorção de nêutrons térmicos ou rápidos em um reator nuclear pode gerar transmutações nucleares e produção de isótopos instáveis e estáveis. As partículas alfa e beta e a radiação gama emitidas durante as transmutações nucleares e produção de isótopos são referenciadas como a radioatividade induzida das reações nucleares. Se a radiação induzida tem uma meia vida longa ou a radiação gama é de alta energia, haverá dificuldade em inspecionar, reparar e desenvolver manutenção sob condições de intensa radiação[6].

Estabilidade à irradiação - a irradiação com nêutrons no reator induz a mudanças sensíveis nas propriedades físicas, mecânicas e metalúrgicas dos materiais. Além disso no combustível, com a fissão do Urânio ou Plutônio são produzidos produtos de fissão, sendo alguns deles gasosos, o que gera uma mudança na matriz do

material combustível. Efeitos como inchamento, densificação, são observados no combustível, mudanças de propriedades mecânicas, como por exemplo, ductilidade e fluência são observadas em materiais estruturais[6].

Interação química e interdifusão de partículas - são frequentemente observadas em espécimes irradiados interações químicas e interdifusão de partículas entre o material combustível e o material utilizado para revesti-lo. Em geral isto pode enfraquecer a integridade estrutural e a estabilidade à irradiação, bem como deteriorar a transferência de calor do combustível para o refrigerante[6].

### **CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS MATERIAIS DE UM REATOR[6].**

Combustível nuclear - tem a função de conter os elementos físséis e férteis que irão produzir as fissões da reação em cadeia – Principais materiais - urânio, plutônio, tório[6];

Estruturas - são todos os materiais utilizados como estrutura e revestimento dos diversos componentes do reator – Principais materiais - zircaloy, aço, inox, ligas de níquel [6];

Moderadores - tem a função de moderar a energia dos nêutrons produzidos na fissão e também servem como refletores na periferia do núcleo do reator de forma a minimizar a fuga de nêutrons do núcleo– Principais materiais - grafite, água leve, água pesada, berílio[6];

Absorvedores - tem a função de manter de forma controlada a reação em cadeia dentro do núcleo– Principais materiais- boro, cádmio, háfnio, índio, prata, gadolínio[6];

Refrigerantes - tem a função de retirar o calor gerado no núcleo do reator devido às fissões nucleares– Principais materiais- hélio, CO<sub>2</sub>, água leve, água pesada, metais líquidos (NaK, Na)[6];

Blindagem - tem a função de servir de barreira para a radiação (blindar) de forma a atenuar os efeitos desta sobre componentes estruturais ou o meio exterior ao reator – Principais materiais- água leve, elementos de médio e alto número atômico (Pb, Fe, etc.)[6];

### **EFEITOS DA IRRADIAÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS[6]**

Nuclear

Seção de choque de fissão – **Diminui**;

Reatividade – **Diminui**;

Queima do combustível – **Aumenta**;

Física

Resistividade Elétrica – **Aumenta**;

Susceptibilidade magnética – **Diminui**;

Resistividade magnética – **Diminui**;

## Térmica

Condutividade térmica – **Diminui**;

Difusividade térmica – **Diminui**;

Coefficiente de expansão térmica – **Leve aumento**;

## Mecânica

Tensão de escoamento – **Aumenta**;

Tensão de ruptura – **Aumenta**;

Tensão de escoamento cíclica Ductilidade – **Aumenta**;

Dureza – **Aumenta**;

Fragilização – **Aumenta**;

Temperatura de transição dúctil-frágil – **Aumenta**;

Fluência – **Aumenta**;

Tempo de ruptura por fluência – **Diminui**;

Resistência a fadiga – **Aumenta (alto ciclo) e diminui (baixo ciclo)**;

## EXEMPLO

Efeitos da irradiação, alta temperatura e alta taxa de deformação nos aços inoxidáveis austeníticos. As curvas dinâmicas tensão-deformação em temperatura ambiente e alta (400, 500 e 550 ° C) dos aços inoxidáveis austeníticos AISI316L, AISI316H, AISI304L e do NimonicAlloy Pe16, após irradiação no reator de alto fluxo (HFR) no JRC- Petten nas doses de 2 e 9,2 dpa foram medidas. Um exemplo deste extenso programa [9–13], relativo ao aço AISI316L, é apresentado na figura 5 [7].

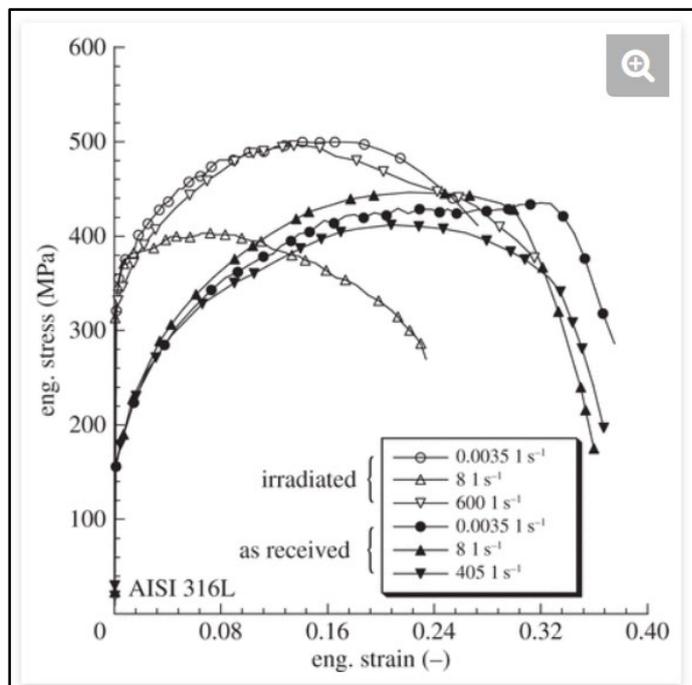


Figura 5 – Curvas de tensão-deformação de aço AISI316L irradiado[7].

### 3 CONCLUSÃO

A definição dos materiais, desde o combustível nuclear as especificações mais complexas devem passar por critérios rigorosos de projeto levando-se em conta os efeitos convencionais de resistência mecânica, ductilidade, integridade estrutural, conformabilidade, usinabilidade, corrosão, propriedades de transferência de calor, estabilidade térmica, compatibilidade e disponibilidade x custo, deve-se principalmente levar em conta as ações e mudanças de comportamento em função das propriedade neutrônicas, radioatividade induzida, estabilidade à irradiação e interação química e interdifusão de partículas.

A metodologia de obtenção de energia elétrica por meio da geração por reatores nucleares deve aumentar apesar de correntes contra. No mesmo sentido deve-se desenvolver novos materiais capazes de tornar estas aplicações viáveis economicamente e tornar as instalações praticamente imunes à acidentes quando operadas dentro de procedimentos e sistemas de segurança. Não há dúvida que não existe nenhuma outra aplicação em que o domínio das ciências dos materiais é exigido ao extremo para que os projetos garantam a segurança de pessoas e instalações.

### REFERÊNCIAS

- 1 MURRAY, R. L. Energia Nuclear. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ. Ed. Hemus, 2004.
- 2 <http://especialmente.com.br/ciencia/tipos-de-energia/energia-nuclear/>. Acesso em 28 de junho de 2018.
- 3 <http://parquedaciencia.blogspot.com.br/2013/09/fissao-ou-fusao-nuclear-qual-diferenca.html>. Acesso em 28 de junho de 2018.
- 4 <http://www.ebah.com.br/content/ABAAe57kAA/energia-nuclear-resumo>. Acesso em 28 de junho de 2018.
- 5 [http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20041/Moacir/usina\\_arquivos/usinanuclear.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20041/Moacir/usina_arquivos/usinanuclear.html). Acesso em 28 de junho de 2018.
- 6 [https://www.ipen.br/portal\\_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/200906040956360-apperrotta.pdf](https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/200906040956360-apperrotta.pdf). Acesso em 28 de junho de 2018.
- 7 <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/372/2015/20130197>. Acesso em 28 de junho de 2018.