

PMT 3531 - PROCESSAMENTO DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES II

Humberto Gracher Riella/Elita Fontenele Urano de Carvalho
elitaucf@ipen.br Humberto.riella@ufsc.br 3133 9266 ou

3133 9269

PMT 3531 – PROCESSAMENTO DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES II

OBJETIVOS

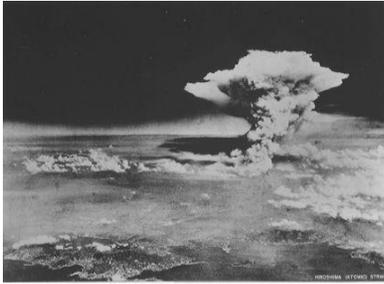
Compreender as etapas de preparação dos combustíveis nucleares a partir da matéria prima contendo urânio enriquecido.

Compreender as diferenças entre combustíveis nucleares cerâmicos, metálicos monolíticos, metálicos dispersos no contexto do projeto de reatores.

PROGRAMA

1. Tipo de combustíveis
2. Projeto do combustível
3. Combustíveis dispersos cermets e metálicos
4. Conformação: dispersão, sinterização fundição
5. Controle dimensional e metrologia
6. Condições de serviço, falhas e vida útil

ENERGIA NUCLEAR



Hiroshima
06/08/1945

Little Boy
160.000 mortes
~16 kt TNT
64 kg U-235



Nagasaki
09/08/1945

Fat Man
80.000 mortes
~21 kt TNT
6,5 kg Pu-239

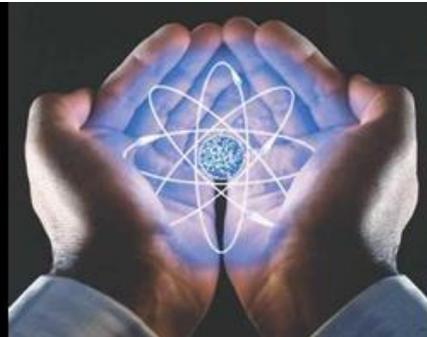
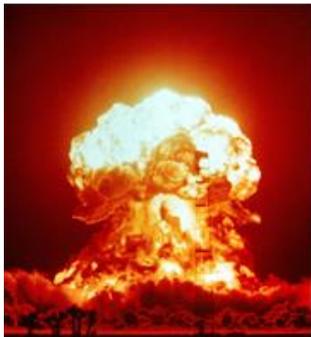


.....Tudo começou com a famosa formula de Albert Einstein:

$$E = m \cdot c^2$$

Massa pode ser convertida diretamente em energia!

- (1911)-átomos tem núcleos/Rutherford
- (1932)_nêutron
- (1938) Fissão do urânio/EnricoFermi
- (1943) Reator nuclear protótipo 1MW



França 80%
Alemanha/Suécia
Japão 26% →9,8%

TEM ENERGIA NUCLEAR

TEM ARMA NUCLEAR



TEM ENERGIA NUCLEAR E ARMA NUCLEAR

REATOR NUCLEAR

1. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM REATOR NUCLEAR

Combustível

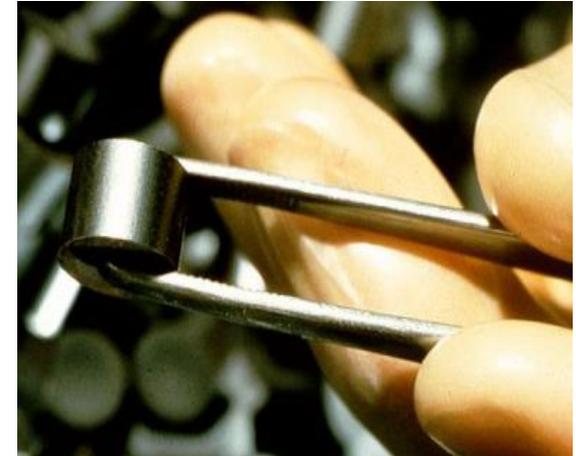
Estrutura

Moderador/Refletor

Absorvedores

Refrigerantes

Blindagem



COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Ligas Metálicas

Urânio Metálico

Ligas de U-Al

Ligas U-Zr e U-ZrH

Ligas de U3Si2

Materiais Cerâmicos

Óxidos: UO_2 , $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$

Carbonetos: UC, $(\text{U}, \text{Pu})\text{C}$

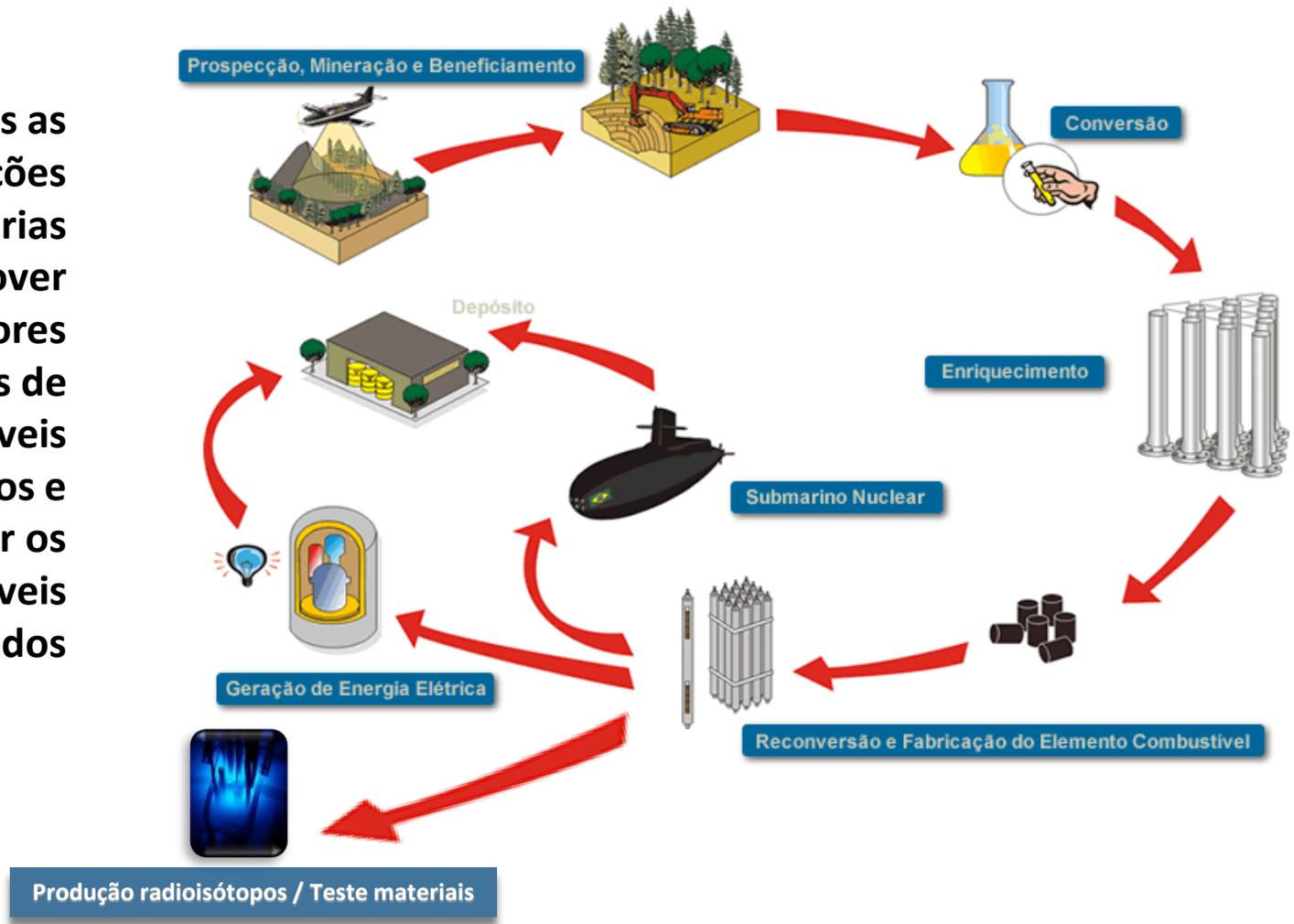
Nitretos: NU, $(\text{U}, \text{Pu})\text{N}$



Partículas cerâmicas esféricas c/ revestimentos cerâmicos (barreiras) e matriz de grafita

Ciclo do Combustível Nuclear do Urânio

Todas as operações necessárias para prover reatores nucleares de combustíveis novos e tratar os combustíveis irradiados



COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Os materiais combustíveis são divididos em materiais **físseis e férteis**.

- i. Físseis (*são materiais que entram em fissão quando bombardeados por neutrons com qualquer energia*)

Urânio 233

Urânio 235

Plutônio 239 e

Plutônio 241

- ii. Férteis (*são materiais que, quando bombardeados, capturam o neutron e transmutam-se, através do decaimento radioativo, em material físsil*)

Urânio 238

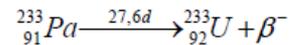
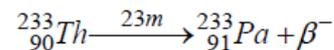
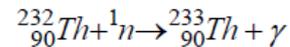
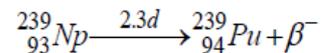
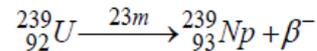
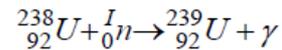
Tório 232

Os isótopos Urânio 238 e Tório 232 são fissionáveis por nêutrons rápidos. O combustível nuclear básico (físsil) é o U-235. A composição isotópica do urânio natural é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição isotópica do urânio natural

Número massa	Composição isotópica (%)	Massa isotópica (u.m.a)	Vida útil(anos)
233	0,0058	234.0409	2.60×10^5
235	0,70	235.0439	$8,50 \times 10^8$
238	99,275	238.0508	4.51×10^9

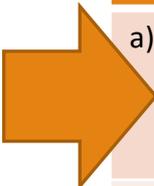
U-233 e Pu-239 são combustíveis físséis sintéticos ou artificiais, ou seja, são produzidos por captura neutrônica nos materiais férteis Th-232 e U-238.



O isótopo U-235 pode ser concentrado por um processo de difusão gasosa ou centrifugação para produzir um combustível de baixo enriquecimento (em U-235) para reatores a água leve ou combustível de alto enriquecimento para reatores de pesquisa (MTR). O Pu-239 (frequentemente misturado com Pu-240, Pu-241 devido a irradiação contínua) é obtido pelo reprocessamento de combustível irradiado e é utilizado como combustível em reatores rápidos (ou regeneradores).

Urânio natural pode ser usado como combustível em reatores refrigerados a gás e reatores moderados a água pesada com baixa densidade de potência

COMPONENTES E MATERIAIS DE UM REATOR NUCLEAR



CLASSIFICAÇÃO	FUNÇÃO	PRINCIPAIS MATERIAIS
a) COMBUSTÍVEL NUCLEAR	tem a função de conter os elementos físseis e férteis que irão produzir as fissões da reação em cadeia	urânio, plutônio, tório
b) ESTRUTURAS	são todos os materiais utilizados como estrutura e revestimento dos diversos componentes do reator	Zircaloy, aço inox, ligas de níquel
c) 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 do reato	grafite, água leve, água pesada, berílio
d) ABSORVEDORES	tem a função de manter de forma controlada a reação em cadeia dentro do núcleo do reator	boro, cádmio, háfnio, índio, prata, gadolínio
e) REFRIGERANTE	tem a função de retirar o calor gerado no núcleo do reator devido às fissões nucleares	hélio, CO ₂ , água leve, água pesada, metais líquidos (NaK, Na)
f) BLINDAGEM	tem a função de servir de barreira para a radiação (blindar), de forma a atenuar os efeitos desta sobre os componentes estruturais ou o meio exterior ao reator	água leve , elementos de médio e alto número atômico (Pb, Fe, etc.)

COMBUSTÍVEIS NUCLEARES

As **FUNÇÕES BÁSICAS DO COMBUSTÍVEL** no reator nuclear são:

- gerar as fissões nucleares;
- transferir a energia gerada na fissão nuclear para o refrigerante;
- reter os produtos de fissão.

As **PROPRIEDADES DESEJÁVEIS** nos combustíveis:

- ✓ Condutividade térmica elevada
- ✓ Baixa expansão térmica
- ✓ Resistente aos danos da radiação
- ✓ Densidade do isótopo físsil
- ✓ Alto ponto de fusão
- ✓ Estabilidade Química
- ✓ Fabricação econômica
- ✓ Baixa seção absorção

ELEMENTO DE COMBUSTÍVEL

No núcleo de reatores nucleares, o combustível é onde ocorre os processos de fissão, envolvendo átomos pesados de urânio ou de plutônio. O combustível fornece a fonte de calor que, em última instância, permitirá geração de eletricidade, ou mesmo a produção de energia para outras aplicações

- Elemento de Combustível Tipo Placa para Reatores MTR
- Elementos de Combustível para Varetas Cilíndricas
- Requisitos Funcionais Básicos Componentes Principais do EC

Combustíveis Nucleares X Tipo de Reator

- Os reatores variam de acordo com compostos e configuração geométrica do combustível e do revestimento tais como:
 - Varetas de combustível
 - Placas de combustível
 - Combustíveis na forma de partículas esféricas de U (ou Pu)
 - Combustíveis líquidos (reat. homogêneos): sais fundidos/soluções
 - Compostos cerâmicos
 - Ligas metálicas
 - Materiais utilizados no revestimento (aço inoxidável, ligas Zr, Al)

Materiais Utilizados no Revestimento

- ▣ Ligas de zircônio para LWR
- ▣ Aços inoxidáveis para reatores rápidos
- ▣ Alumínio para reatores de pesquisa e teste de materiais
- ▣ SiC para reatores refrigerados a gás
- ▣ Ligas refratárias para aplicações em alta temperatura (isto é, W, Ta, Nb, Mo, V)

Os **COMBUSTÍVEIS NUCLEARES** são formados dos elementos físseis e férteis (U, Th, Pu) sob diversas formas de compostos e de materiais estruturais que servem de elementos de ligação, revestimento e estrutura.

A característica do combustível está associada às necessidades neutrônicas e térmicas e depende da compatibilidade do teor do material físsil/fértil com o processo de fabricação e também do seu desempenho sob irradiação.

Pode-se ter, por exemplo, combustíveis com alto ou baixo enriquecimento de U-235.

Na realidade o que se procura é uma relação de materiais físsil/fértil/estrutural que atendam as características neutrônicas necessárias mas também atendam ao fator tecnológico de fabricação e que tenha o desempenho adequado sob irradiação e condições de temperatura no reator.

De uma maneira geral, procura-se associar o urânio (tório ou plutônio) à materiais de baixa seção de choque de absorção de forma a se trabalhar com a relação teor de urânio/concentração isotópica de U-235 adequada pelos fatores anteriormente mencionados.

A Tabela 3 mostra uma relação de compostos de urânio utilizados como combustível nuclear, verificando-se a relação do teor de urânio nestes compostos e a Tabela 4 algumas propriedades nucleares de compostos de urânio.

Os principais **MATERIAIS COMBUSTÍVEIS** estão em forma de **LIGAS METÁLICAS, MATERIAIS CERÂMICOS E DISPERSÕES.**

ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS

- Inchamento sob irradiação(>60% em combustíveis altamente irradiados);
- Altamente reativo quimicamente e tem compatibilidade a alta temperatura somente com alguns materiais refrigerante(CO2 e He), É usado em reatores com Pu, a baixa temperatura e inicialmente usado nos reatores ingleses (refrigerados a gas)

- Reatores MTR;
- T=150graus C com revestimento de Al;
- Em T altas existe interação do Al e U assim como aceleração da corrosão,
- 40-90% enriquecimento,
- Perdeu mercado

- Reator de potencia,
- Zr tem alto ponto de fusão,
- baixa seção de choque de absorção,
- boa resistência à corrosão e o urânio é pouco solúvel
- Ligas de 14% bom desempenho

- **Ligas Metálicas**

Urânio Metálico
Ligas de U-Al
Ligas U-Zr
Ligas de UMo

- **Materiais Cerâmicos**

Cermets (Dispersões)

Boa economia de nêutrons
Alta condutividade térmica
Boa conformidade dentro de certos limites de U
As ligas metálicas possui o inconveniente de uma baixa temperatura de fusão, por outro lado temos a formação de eutéticos* que trazem ainda a temperatura para baixo, o que implica que a sua utilização seja limitada para menos de 1.000°C

Os óxidos, por outro lado são altamente estáveis, e altamente refratários, exibindo temperaturas de fusão superiores a 2500°C. Porém não proporcionam um material ideal devido a sua fraca condutividade térmica

Os nitretos, carbetos potencialmente mais satisfatórios em termos de condutividade térmica, são no entanto muito difícil ganhar a aceitação, pois não apresentam uma melhoria significativa em comparação com os combustíveis óxidos

LIGAS METÁLICAS

As principais ligas metálicas utilizadas como combustível nuclear são: urânio metálico, ligas de urânio-alumínio, ligas de urânio-zircônio, urânio-molibdênio, etc.

Os combustíveis de ligas metálicas tem as seguintes vantagens: boa economia de nêutrons, alta condutividade térmica e boa conformabilidade dentro de certos limites de teor de urânio.

Urânio Metálico

Apresenta um substancial inchamento sob irradiação (> 60% em combustíveis altamente irradiados).

É altamente reativo quimicamente e tem compatibilidade a alta temperatura somente com alguns materiais refrigerantes (CO₂ e He).

É usados em reatores plutonígeros, a baixa temperatura, e foi utilizado inicialmente nos reatores ingleses (reatores de potência refrigerados a gás). Em ambos os tipos de reatores a queima é limitada em um valor baixo para diminuir os danos da irradiação e produção dos isótopos mais pesados de plutônio.

Urânio Metálico

↪ $\rho = 19,04 \text{ g/cm}^3$ a $26 \text{ }^\circ\text{C}$ (α - ortorrômbico)

↪ Ponto de fusão: $1.132 \text{ }^\circ\text{C}$, Ponto de ebulição: 3.800 a $3.900 \text{ }^\circ\text{C}$

↪ Metal muito reativo, reagindo c/ vários metais e lentamente com o ar a T_{amb} , é pirofórico na forma de pó ou cavacos T_{amb}

↪ Sofre transformações de fase entre T_{amb} e $1.132 \text{ }^\circ\text{C}$

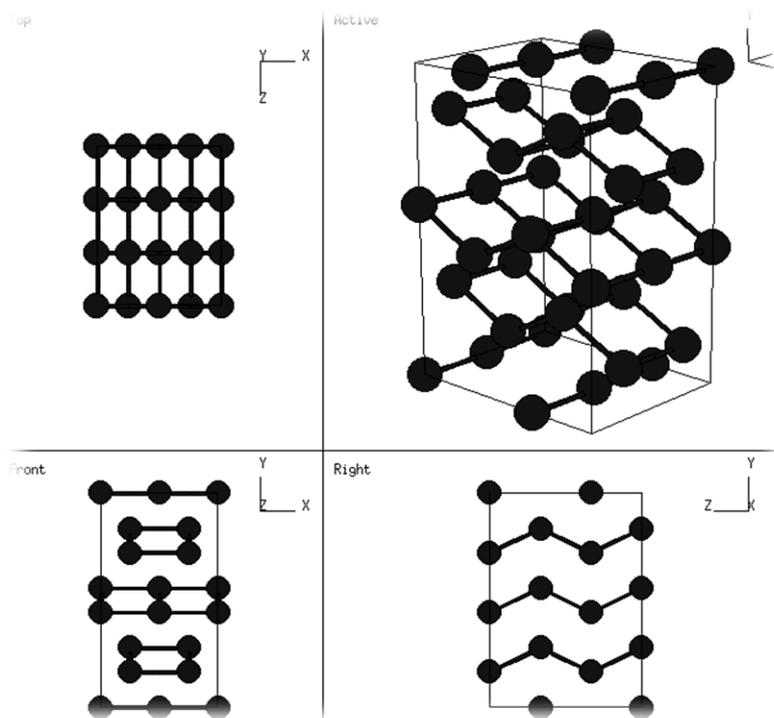
↪ Desvantagem da fase estável a baixa T ser ortorrômbica: há expansão desigual em diferentes direções c/ o aquecimento ⇒ após alguns ciclos, distorções permanentes (alterações volume)

Temperatura de Transição $^\circ\text{C}$	Fase	Estrutura Cristalina
660	Sólido - α	Ortorrômbica
760	Sólido - β	Tetragonal
1132	Sólido γ - líquido	Cúbica
3900	Líquido-vapor	-

Fases do Urânio Metálico

Urânio Alfa:

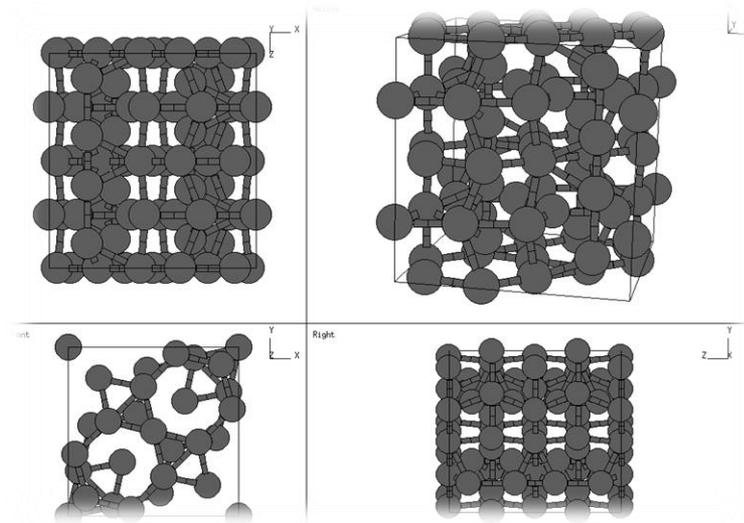
Estrutura ortorrômbica, grupo espacial $Cm\bar{c}n$, com 4 átomos por célula unitária, densidade de $19,12 \text{ g/cm}^3$, sendo estável até 662°C . Esta estrutura cristalina do urânio α é única entre os materiais metálicos, contendo certo grau de ligações covalentes. Cristalograficamente, não é muito favorável à formação de soluções sólidas, mesmo quando o tamanho e a valência do átomo soluto são favoráveis



Fases do Urânio Metálico

Urânio Beta:

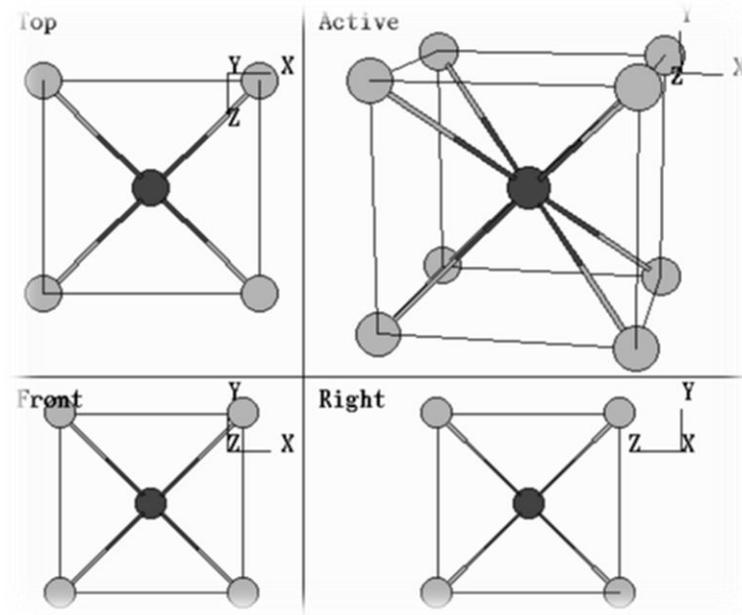
Essa fase tem uma estrutura tetragonal complexa, com o grupo espacial $P4/mnm$ contendo 30 átomos por célula unitária. A densidade dessa fase é $18,11 \text{ g/cm}^3$ a 720°C e tem dureza elevada, devido a certo volume de ligações não metálicas, como ocorre com o urânio alfa. Sua faixa de estabilidade é de 662°C a 769°C . O Vanádio e o Nióbio (pentavalentes), bem como, o Cromo e o Molibdênio (hexavalentes) conseguem reter a fase Beta após resfriamento até a temperatura ambiente



Fases do Urânio Metálico

Urânio Gama:

Estrutura cúbica de corpo centrado, grupo espacial B2, com 2 átomos por célula, com densidade de 18,06 g/cm³ (22). Nesta fase, o urânio encontra-se no estado químico/cristalográfico mais próximo do comportamento de um material metálico típico e sua faixa de estabilidade ocorre de 769°C até o ponto de fusão, em 1132 °C. A fase gama do urânio apresenta, em geral, valência de 5, 6 ou 8, dependendo dos elementos de liga, que variam com base no tamanho atômico, estrutura cristalina e número de valência.



Ligas de U-Al

Foram utilizadas em larga escala em reatores de pesquisa (MTR).

- As temperaturas envolvidas nestes reatores (150° C) permitem a utilização destas ligas associadas a revestimentos de alumínio.
- Em temperaturas mais altas há reações químicas entre o urânio e o alumínio, bem como há uma aceleração do processo de corrosão do revestimento.
- Normalmente são utilizados enriquecimentos de ordem de 40% a 93% de U-235 já que o teor de urânio na liga é limitado.
- Recentemente, com a limitação internacional de fornecimento de urânio enriquecido (limitado a 20% de enriquecimento) estas ligas tem sido menos usadas mas demonstraram um alto desempenho sob irradiação.

Ligas de U-Zr

- Tem aplicação em reatores de potência.
- O zircônio tem um alto ponto de fusão, baixa seção de choque de absorção, boa resistência à corrosão e o urânio é pouco solúvel nele.
- Ligas contendo 14% de urânio foram utilizadas demonstrando um bom desempenho sob irradiação.

Neste tipo de combustível não é possível ciclagens térmicas acima de 600°C, pois há mudança de fase acarretando mudanças geométricas e estruturais.

- Ligas deste tipo são de bom desempenho para combustíveis altamente enriquecidos já que provêm meios de diluir o combustível altamente enriquecido através de uma estrutura que tem uma área adequada para transferir o calor gerado (reator de potência).
- O aumento do desempenho de combustíveis e da eficiência térmica de uma usina nuclear de potência requer que tanto a temperatura do combustível quanto a temperatura de operação da usina seja elevada ao máximo possível (rendimento térmico maior quanto maior o $\Delta T_{\text{fonte quente e fria}}$ e maior o T_{med} . O aumento da temperatura de operação nos combustíveis metálicos pode resultar em dois efeitos adversos:
 - a) Fusão na parte central do combustível devido ao baixo ponto de fusão das ligas utilizadas;
 - b) Inchamento e taxa de fluência (creep) excessivos devido a instabilidade sob irradiação a alta temperatura.

Ligas de Urânio

- ↪ As ligas de U com fase γ têm melhor desempenho que as de fase α ;
- ↪ Elementos de liga estabilizadores da fase γ devem ter baixa secção de captura de nêutrons;
- ↪ Alguns elementos de liga utilizados: Zr, Nb, Ti, Mo (para alta T e baixos “burnups”);
- ↪ O emprego de estabilizadores da fase γ \Rightarrow redução da densidade de U

MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos são sólidos inorgânicos, não metálicos que tem alto ponto de fusão.

Nos cerâmicos, a ligação interatômica é predominantemente iônica ou covalente. Os cerâmicos podem, portanto, ser processados ou operados a altas temperaturas podendo ser um combustível apropriado para alto desempenho.

As vantagens de se usar materiais cerâmicos em combustíveis de reatores de potência são:

- maiores temperaturas permitidas para o combustível devido ao alto ponto de fusão;
- boa estabilidade a irradiação (dimensional e estrutural) devido a ausência de transformações de fase a baixas temperaturas;
- alta resistência a corrosão e compatibilidade com o revestimento (zircaloy, aço inox) e o refrigerante (água, vapor) no reator.

Os principais materiais cerâmicos utilizados como combustível nuclear são: UO_2 , $\text{UO}_2\text{-PUO}_2$, ThO_2 , UC, UN

As **PROPRIEDADES NUCLEARES BÁSICAS** nos combustíveis cerâmicos são:

- alto número de átomos de urânio por unidade de volume evitando a necessidade de alto enriquecimento do urânio;
- baixo número de massa e baixa seção de choque de absorção dos elementos não físséis no composto.

Em reatores de potência a água leve (PWR, BWR) e água pesada (PHWR, CANDU) é utilizado combustível de UO_2 .

O combustível de UO_2 é mais comumente apresentado em forma de pastilhas cilíndricas sinterizadas com densidade na faixa de 92 a 95% da densidade teórica (Processo de fabricação: compactação do pó de UO_2 na forma de pastilhas e sinterização posterior a 1600°C).

A condutividade térmica do UO_2 é um pouco baixa e a alta potência gerada no reator leva a existência de altos gradientes térmicos na pastilha combustível.

Como consequência, são geradas tensões térmicas que causam rachaduras no material cerâmico, mas que não causam grandes problemas de desempenho, pois o revestimento metálico retém o material combustível.

Altos níveis de potência podem levar a fusão da parte central da pastilha, no entanto isto é evitado em reatores térmicos, pois pode gerar problemas de desempenho.

As principais limitações no desempenho do UO_2 são o inchamento da pastilha causado por produtos de fissão (sólidos e gasosos) e a liberação de produtos de fissão gasosos para o ambiente contido pelo revestimento, deteriorando a transferência de calor do combustível para o refrigerante.

Combustíveis de UO_2 - PuO_2 e ThO_2 são utilizados em reatores rápidos (regeneradores).

Combustíveis de UC, UN e U_3Si_2 tem sido pesquisados como combustíveis de alto desempenho sob irradiação com potencialidade de substituição do UO_2 em reatores de potência.

DISPERSÕES (CERMETS)

São combinações de misturas metal-cerâmico ou combinações de metais com cerâmicas. As suas propriedades ficam entre as propriedades dos metais e as propriedades das cerâmicas que o constituem.

- ❖ Combustíveis na forma de dispersões consistem de partículas de combustíveis, com formato aproximadamente esférico, dispersas em um meio (matriz) metálico, cerâmico ou de grafita
- ❖ Distinguem-se do combustível de urânio metálico, utilizado nos primeiros reatores, ou de pastilhas de UO_2 (comb. cerâmico) utilizado na maioria dos reatores atuais
- ❖ O princípio básico dos combustíveis à dispersão é isolar as partículas de combustível de maneira que um volume significativo da matriz não seja danificado pelos produtos de fissão
- ❖ Dessa forma, com as partículas combustíveis restritas, podem ser atingidos “burnups” mais elevados, os produtos de fissão são contidos e a transferência de calor para o revestimento é preservada
- ❖ MTR (1952) – partículas de UAl_x (UAl_2 , UAl_3 e UAl_4 disp. Al); outros ex.: UO_2 em SS, UO_2 em BeO, U em Zr-H (TRIGA), PuO_2 - UO_2 em SS, UO_2 em Zr (propulsão naval), UO_2 - UC_2 em grafita (HTGCR)

DISPERSÕES (CERMETS)

A condutividade térmica das dispersões, por exemplo, é normalmente mais baixa que a do metal, mas superior ao cerâmico que o compõe.

Alguns itens de comparação entre dispersões e cerâmicos são:

- dispersões tem maior resistência mecânica e ductilidade que cerâmicos;
- dispersões tem maior resistência a choque térmico que cerâmicos, embora sejam ainda relativamente frágeis;
- dispersões tem as propriedades combinadas de metais e cerâmicos. Ambos tem uma alta resistência a irradiação e corrosão. Ambos são relativamente estáveis a altas temperaturas.

Os combustíveis nucleares constituídos de dispersões podem oferecer vantagens sobre os combustíveis de ligas metálicas tais como:

- aumento da vida útil de operação do combustível no reator, pois os danos dos produtos de fissão ficam localizados em uma zona imediatamente adjacente da fase dispersa (contendo elemento físsil) minimizando os danos da matriz metálica e minimizando o inchamento;

- a seleção dos materiais pode ser estendida de modo a permitir o uso de materiais combustíveis cerâmicos diluídos em materiais metálicos conseguindo-se propriedades físicas, térmicas e mecânicas que não seriam alcançadas com o material combustível básico.

Os combustíveis nucleares de dispersões são constituídos, normalmente, de materiais combustíveis cerâmicos (UO_2 , U_3O_8 , UC, PUO_2 , U_3Si_2 , etc.) dispersos numa matriz contínua de um material estrutural não físsil (Al, zircaloy, aço inox, grafite).

A fim de minimizar os danos da irradiação e prover resistência mecânica e ductilidade, o diluente (material estrutural) deve predominar no volume de forma a se constituir numa matriz contínua envolvendo a fase físsil, e se constituir no material estrutural do combustível.

Para se alcançar os objetivos desejados de desempenho num combustível de dispersão os seguintes itens devem ser observados:

- o tamanho das partículas dispersas (físsil) deve ser grande comparado ao percurso médio de um fragmento de fissão;
- a distribuição das partículas dispersas na matriz do metal deve ser o mais uniforme possível;
- a densidade do material da fase dispersa (físsil) deve ser alta;
- a fase contínua da matriz de metal deve ter o máximo de volume possível na dispersão

Com uma seleção apropriada do tamanho da partícula dispersa, distribuição uniforme das partículas, alta densidade do material físsil e máximo volume possível da fase de matriz contínua pode-se minimizar os danos de irradiação no combustível.

As dispersões podem, no entanto, ter dificuldades de manter a uniformidade de propriedades físicas, mecânicas e térmicas durante irradiação no reator, particularmente a resistência mecânica, ductilidade, resistência à corrosão e estabilidade sob irradiação.

Os principais combustíveis com dispersões utilizados são:

- UO_2 disperso em aço inox ou zircaloy;
- (U, Th) C2 ou UO_2 em matriz de grafite;
- U_3O_8 , U_3Si_2 , U_3Si disperso em matriz de alumínio.

O UO_2 disperso em aço inox ou zircaloy tem aplicação em reatores de potência refrigerados a água.

As dispersões de carbonetos e óxidos de urânio e tório em grafite são utilizadas em reatores de alta temperatura refrigerados a gás.

Como o alumínio possui baixa seção de choque de absorção mas possui restrições em relação à faixa de temperatura que pode ser utilizado (baixo ponto de fusão – 650 °C) ele é utilizado principalmente em combustíveis de reatores de pesquisa (MTR) onde podem ser obtidos altos fluxos de nêutrons a relativamente baixas temperaturas (< 150°C).

A utilização de dispersões de materiais de alta densidade em urânio (U_3O_8 , U_3Si_2 , U_3Si , U_6Fe) em matriz de alumínio foi a solução encontrada para substituir os combustíveis de alto enriquecimento dos reatores MTR (ligas de U-Al).

Como mencionado anteriormente, por imposições internacionais, ficou limitado o fornecimento de Urânio a 20% de enriquecimento de U-235.

A substituição de ligas de U-Al de alto enriquecimento (93%) foi alcançada através de combustíveis com estas dispersões de materiais de alta densidade de urânio, o que torna possível utilizar enriquecimento inferior a 20%.

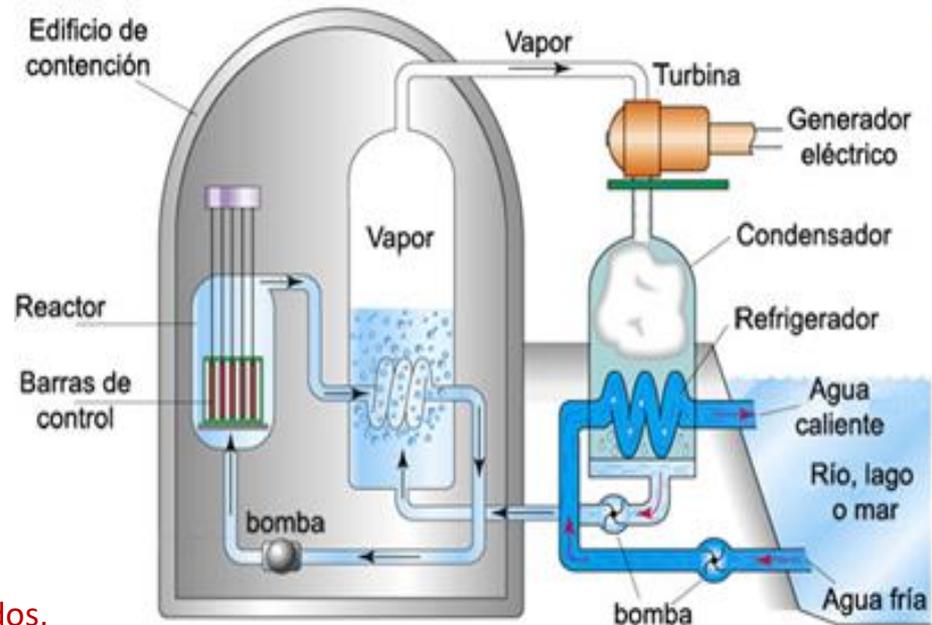
REATOR PWR

O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DESTE REATOR É BASEADO NO FATO DA ÁGUA SOB ALTAS PRESSÕES MANTER-SE LÍQUIDA.

O COMBUSTÍVEL NUCLEAR FICA NESTA ÁGUA QUENTÍSSIMA E SOB ALTA PRESSÃO. ATRAVÉS DE UM TROCADOR DE CALOR, OCORRE A TRANSMISSÃO DE CALOR PARA A ÁGUA QUE VAI PARA UMA TURBINA, ONDE PRODUZ ELETRICIDADE.

Sucesso:

- Foi o reator mais patrocinado pelos Estados Unidos,
- tem segurança intrínseca,
- não torna radioativa a turbina e é dos tipos mais seguros



Propriedades Térmicas de Alguns Materiais Utilizados como Combustíveis Nucleares

Material	Temperatura de Fusão °C	Condutividade Térmica (w/cm.°C)
U°	1132 (668 °C $\alpha \Rightarrow \beta$) (774 °C $\beta \Rightarrow \gamma$)	0,273 a 93,3°C 0,349 a 538°C 0,381 a 760 °C
UO ₂	2865	0,078 a 93,3°C 0,044 a 499°C 0,018 a 1999°C
UC	2380	0,33 a 44°C
ThO ₂	3299*	0,125 a 93,3 °C 0,046 a 538°C 0,029 a 1315 °C
PuO ₂	2400	Inferior ao UO ₂

* A mais alta entre todos os óxidos.

COMBUSTÍVEL PWR - MATERIAIS

- ▣ Incorporação de isótopos físséis em ligas metálicas estáveis;
- ▣ Cerâmicas refratárias (óxidos, carbonetos, nitretos ou silicetos);
- ▣ Outros materiais, mais complexos, tomando a forma de cermet (combinações de cerâmico-cerâmico) ou cermet (cerâmico-metal);
- ▣ Compósito(material formado por junção de outros materiais com o objetivo de se obter um produto de maior qualidade)

COMBUSTÍVEL PWR - MATERIAIS

- ▣ Nos PWR, o núcleo é constituído por conjuntos de varetas combustível de liga de zircônio, acondicionando as pastilhas de óxido de urânio (urânio enriquecido a $\approx 4\%$ de U^{235}), pastilhas MOX (misturado óxidos de urânio e plutônio $[(U, Pu)O_2]$, com um teor de Pu 5-10%).
- ▣ O Porque da escolha (UO_2): Grande compatibilidade química com o refrigerante, no caso de uma falha na primeira barreira de contenção.

COMBUSTÍVEL PWR - BURNUP

- ▣ É a energia extraída do elemento combustível deste o momento que entra no reator até sua saída subiu em 20 anos de 33GWd/t para 52GWd/t. Este valor permanece ainda baixo, considerando-se o potencial do material físsil no combustível. O principal limitante está no caráter tecnológico....e as P&D seguem...
- ▣ Desenvolvimento e na qualificação de uma liga de zircônio (M5[®]: zircônio-niobio), para proporcionar um material de revestimento mais resistente à corrosão do que Zircaloy 4, tornando possível aumentar queimas de até 60 GWd/t.
- ▣ O desenvolvimento e qualificação de um combustível UO₂ dopado com óxido de cromo, devendo a longo prazo trazer uma maior flexibilidade de operação do reator e elevar ainda mais o *burnup*

BURNUP E PRODUTO FISSÃO

Queima “burnup”:

- É uma medida da quantidade de U (ou Pu) fissionada
- Unidades: MW.dia/tU ou % atômica
- Combustível LWR atualmente limitado a ≈ 50.000 MWD/t
- Experimentos > 70000 MWD/t
- Combustível metálico e de óxido para reatores rápidos, queima limitada a ≈ 10 at.%
- Experiências até 20 at.%
- Combustíveis tipo dispersão (reatores de pesquisa HEU) limites ≈ 50 at.%
- 50-90% dos átomos úteis de U (Pu) não são queimados - motivação para reprocessamento

Produtos de fissão:

- Dois átomos substituem cada átomo de U (ou Pu) que fissiona
- Mais de 30 elementos químicos podem ser produzidos por fissão
- Composição química do combustível pode evoluir substancialmente durante a irradiação
- 25% dos produtos de fissão são átomos de gás (Kr, Xe)

REATORES ANGRA 1 E 2

		Angra 1	Angra 2
Tipo		PWR	PWR
Criticalidade		1982	1999
Potência elétrica		626	1350
Combustível		Pastilhas de UO2	Pastilhas de UO2
Diâmetro pastilhas		49,3tHM	103tHM
Carregamento combustível		Inicial:2.1/2.6/3.1% Recargas:3.3%	Inicial: 1.8/2.5/3.2% Recargas:3.3%
Revestimento		Zr 4	Zr 4
Temperatura máxima do revestimento		350°C	349°C
Temperatura máxima do combustível		1800°C	2092°C
Elementos combustíveis		121	193
Número de barras de controle por elemento		235 33000MWt/l	2 35000MWt/l
Queima média da descarga		107,9kWt/l	93.2kWt/l
Densidade média de potência		Ag/In/Cd	Ag/In/Cd
Barras de Controle		287.5/326.3°C	293/332°C
Temperatura da água refrigerante primário		154 bar	156 bar
Pressão do primário		2	4
Número de circuitos de refrigeração		Cilíndrico	Cilindro
Vaso de Pressão		AS 508 Cl 12 170mm espessura Concreto reforçado	20MnMoNi55 250mm espessura Concreto reforçado
Contenção externa		12meses,35.1% do combustível trocado	12meses
Ciclo			

COMBUSTÍVEL PWR

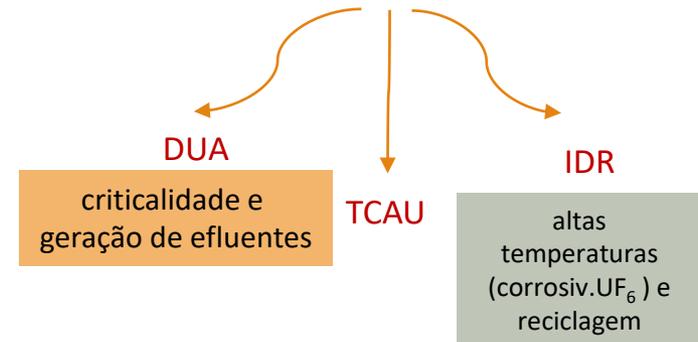
Combustível cerâmico:

- UO_2 (ou $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ no caso MOX).
- Quimicamente estáveis e compatíveis com água, estes óxidos são altamente resistentes a altas temperaturas e irradiação,
- O oxigênio do óxido é um fraco absorvedor de nêutrons, após a fissão mantém sua estrutura cristalina (cúbica)



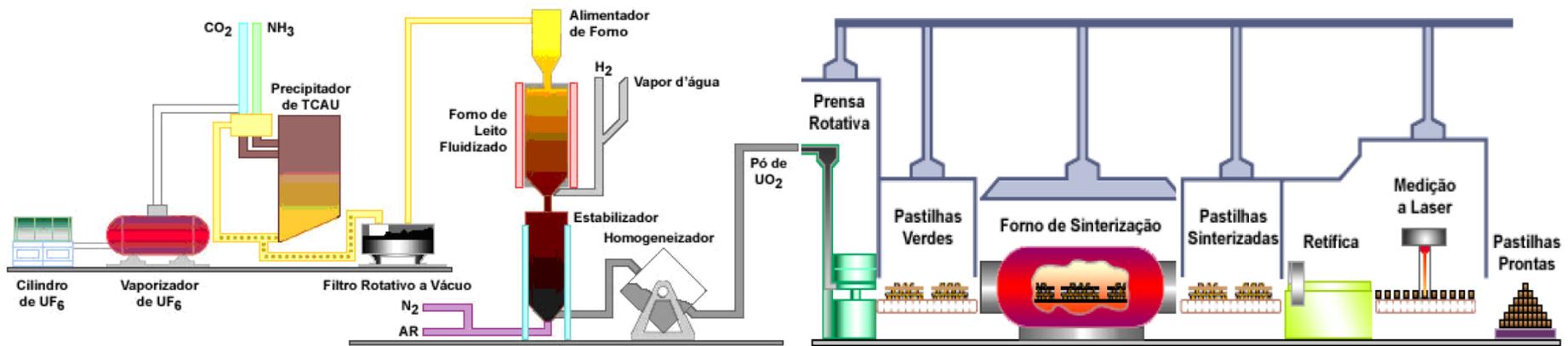
- Requerer número de etapas pequeno e poucas operações complementares
- Evitar a geração de efluentes (rejeitos líquidos)
- Restringir a quantidade de insumos necessários
- Apresentar pequena variação nas propriedades dos produtos intermediários
- Permitir o controle das propriedades do produto final (pastilhas)
- Evitar geração de finos e minimizar perdas
 - Permitir a obtenção de elevado grau de homogeneidade
 - Manutenção e operação simples, se possível confinada e remota

PROCESSO DE RECONVERSÃO UF₆ - UO₂

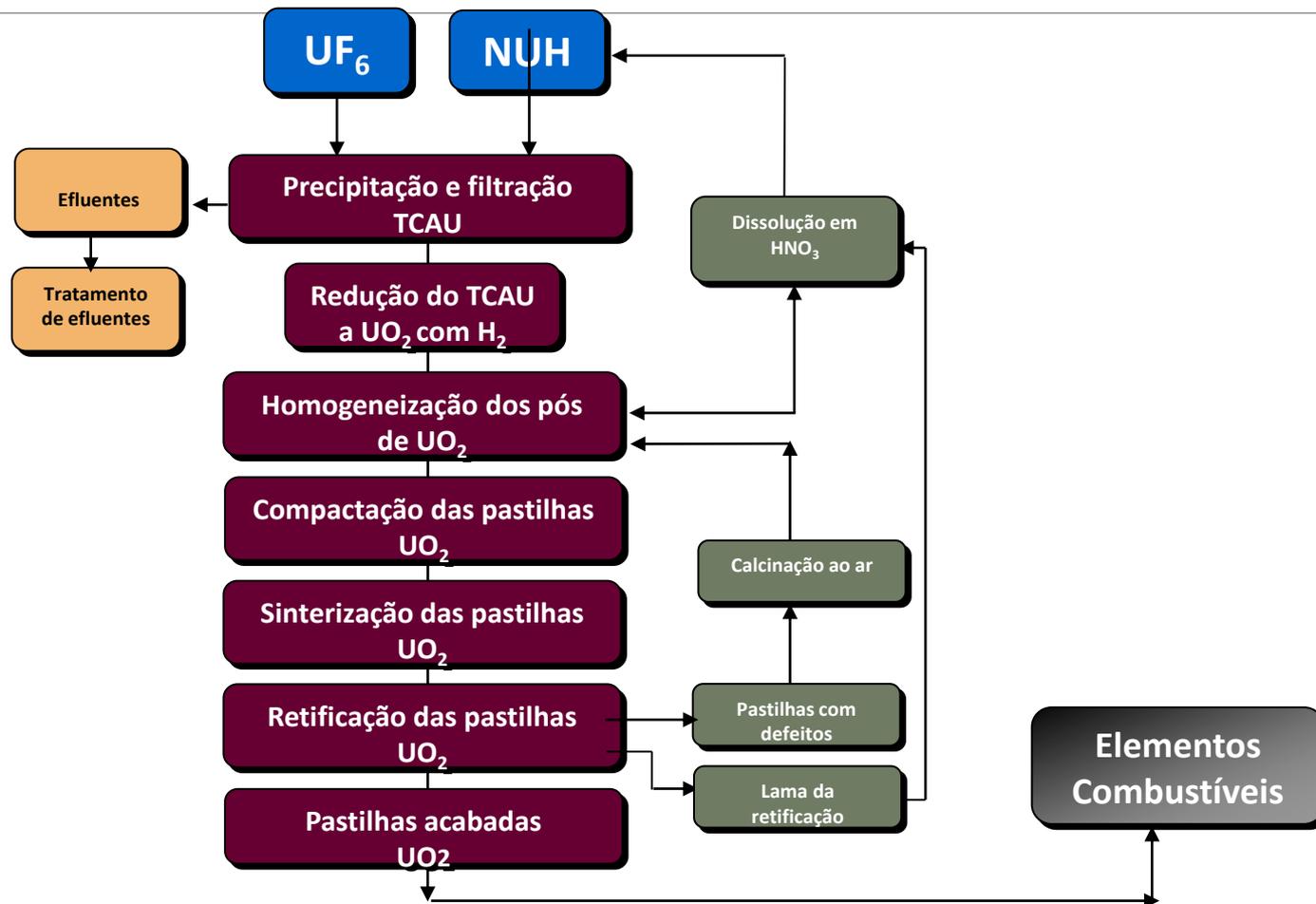


PROCESSO DE RECONVERSÃO UF6 A UO2

TCAU



criticalidade e
geração de efluentes



PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PASTILHAS DE UO₂



PRENSA



FORNO

PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PASTILHAS DE UO₂

- É o material mais utilizado para reatores de potência (PWR, BWR, AGR, PHWR, LWGR)
- **Vantagens:**
 - Boa estabilidade térmica (não transform. fase)
 - Elevado ponto de fusão $\approx 2.800^{\circ}\text{C}$
 - Massa específica $10,96 \text{ g/cm}^3$
 - Baixa reatividade química c/ $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ e $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$
 - Boa estabilidade a danos por irradiação
 - Baixa dilatação térmica até 1800°C
- **Desvantagens:**
 - Baixa condutividade térmica
 - Aquecido ao ar, oxida-se a U_3O_8
- **Utilização:**
 - Na forma de pastilhas cilíndricas sinterizadas
 - Massa de cada pastilha ≈ 7 a 8 g
 - 60 t para reator PWR 600 Mwe
 - 100 t para reator PWR 1200 Mwe
 - $\approx 1/3$ dos EC são substituídos a cada ano

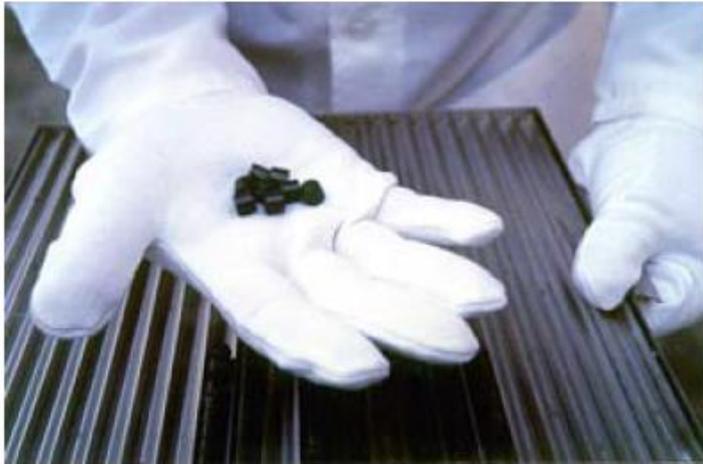


PASTILHAS



MEDIÇÃO

PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PASTILHAS DE UO₂

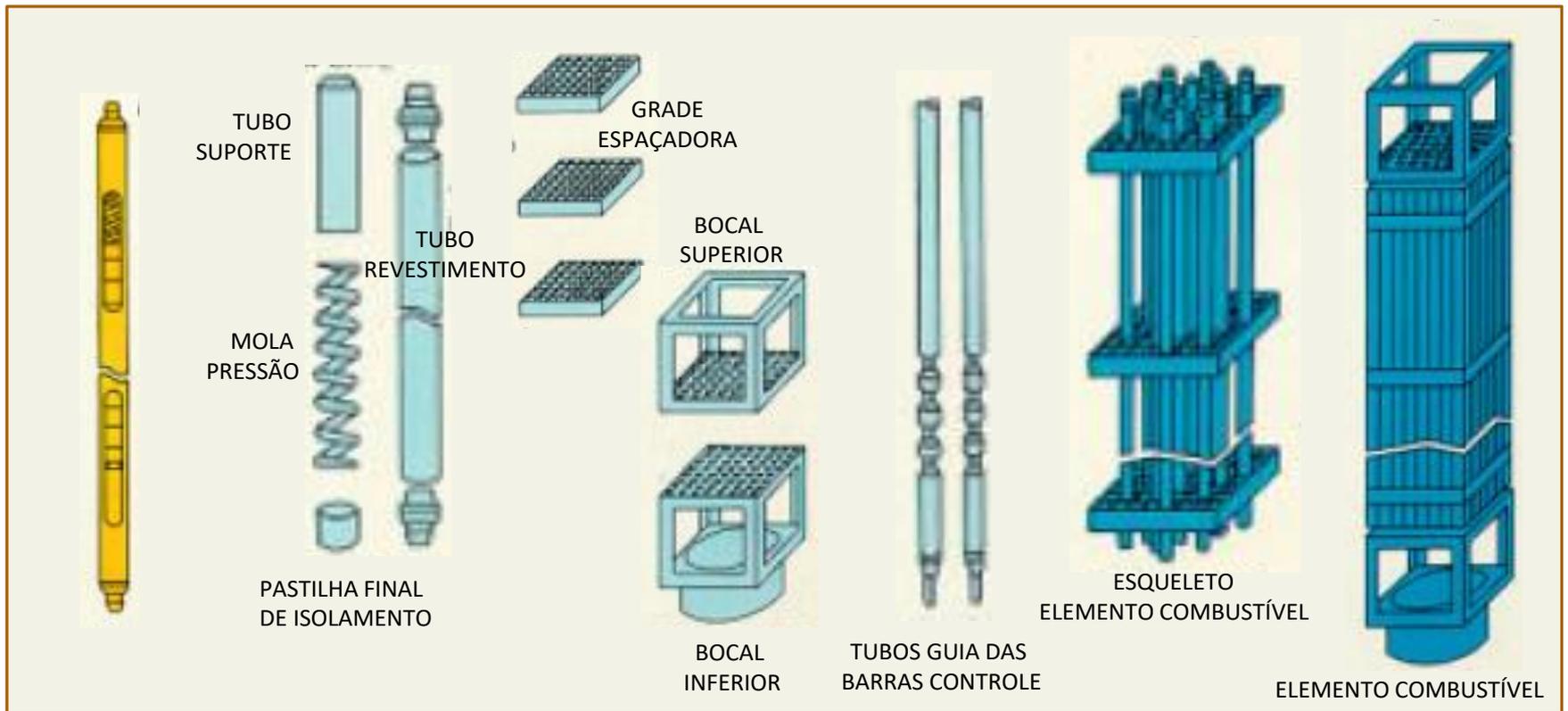


PASTILHAS



MEDIÇÃO

COMBUSTÍVEIS TIPO VARETA - UO₂



VARETA COMBUSTÍVEL

↪ O óxido é condicionado sob a forma de pastilhas sinterizadas (com um altura e diâmetro de cerca de 1cm sendo a altura maior do que o diâmetro).
As pastilhas são empilhadas dentro de um tubo de revestimento metálico para conter os produtos de fissão.

↪ O material de revestimento é uma liga de zircônio, selecionada pela sua transparência aos nêutrons, propriedades mecânicas e de resistência a corrosão.

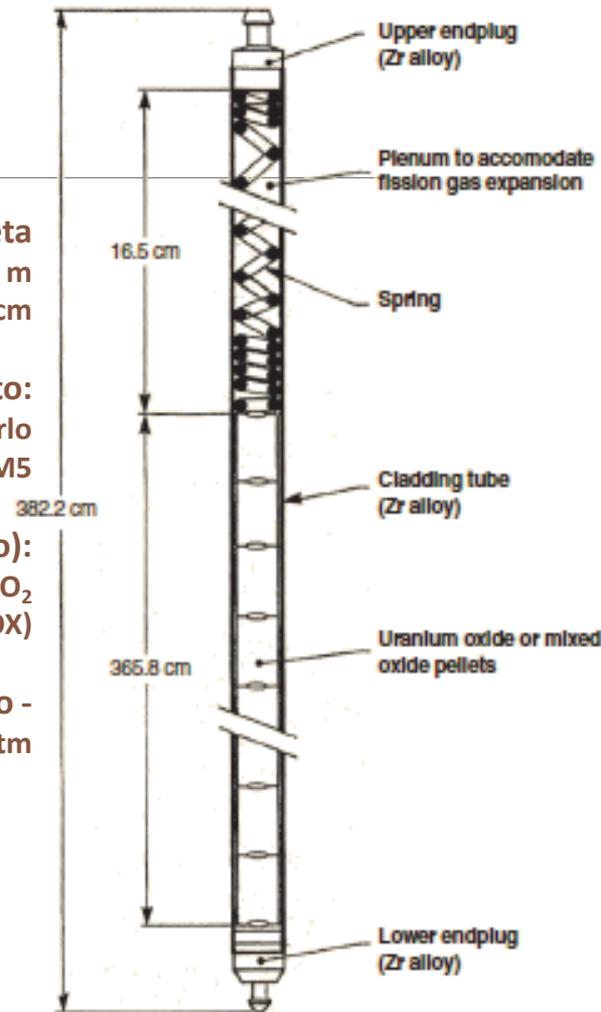
↪ A liga mais comumente usado, até à data, em PWRs, foi zircaloy 4, porém, atualmente este está sendo substituídas por novas ligas à base de nióbio e zircônio

Vareta
Comprimento ≈ 4 m
Diâmetro ≈ 1 cm

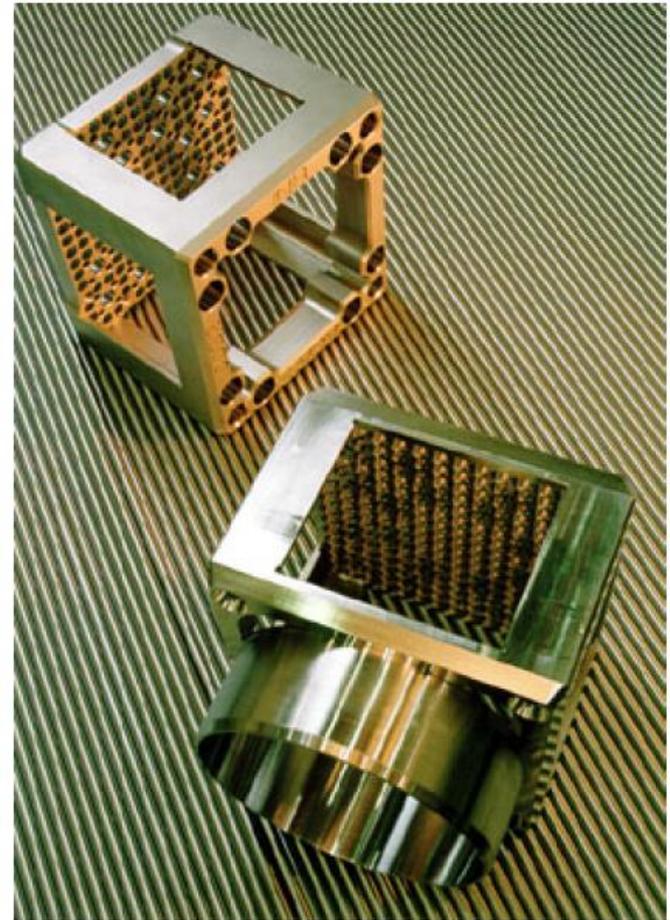
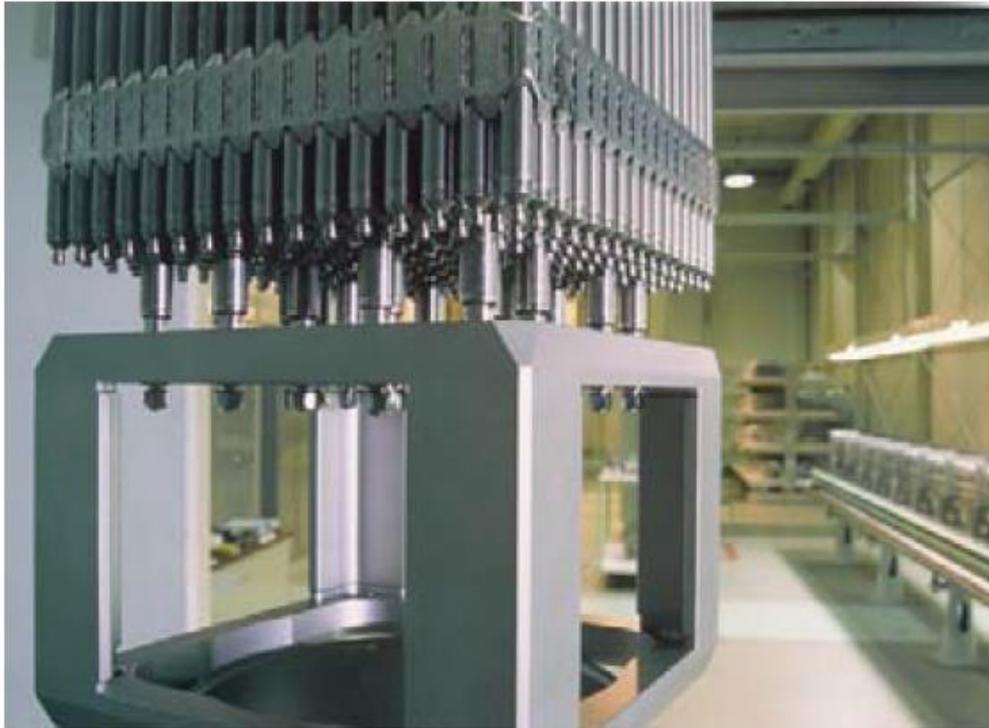
Revestimento:
Zr/1.5% FeCr Sn/0.5% -zircaloy, Zr/Nb -Zirlo
M5

Combustível (óxido):
- UO_2
- $(\text{U,Pu})\text{O}_{2-x}$ (MOX)

Gap entre combustível /revestimento -
hélio a ≈ 10 atm



VARETA COMBUSTÍVEL



MONTAGEM COMBUSTÍVEL



As varetas são colocadas em um conjunto para formar um “elemento combustível” posicionados numa matriz de malha quadrada. Esta disposição geométrica permite a circulação de água entre as varetas, e assim a remoção de calor gerado dentro do núcleo do reator. Num reator de água pressurizada esta estrutura é aberta e a água pode circular transversalmente no elemento.

ELEMENTO COMBUSTÍVEL USINA ANGRA



PMT 3531 – PROCESSAMENTO DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES II



PMT 3531 – PROCESSAMENTO DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES II