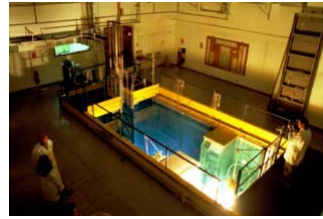


FUNDAMENTOS  
DE TECNOLOGIA  
NUCLEAR



Materiais e Ciclo  
do Combustível



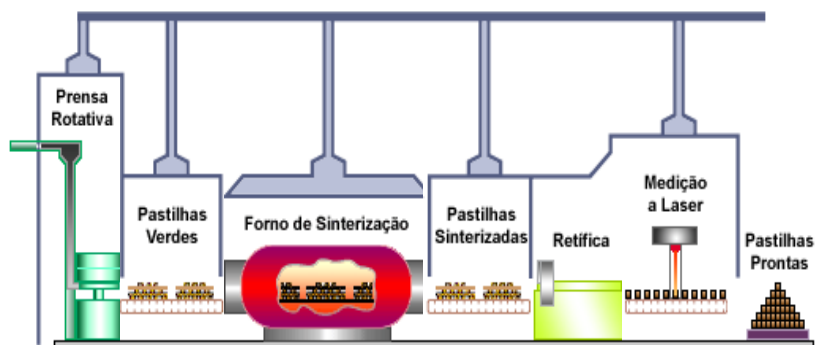
Profs.:  
Afonso Aquino e  
Arnaldo Andrade



*Ipen*  
2007



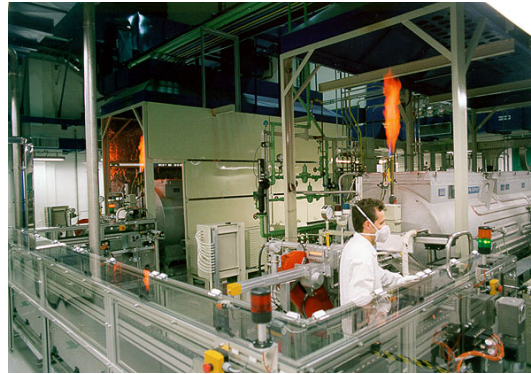
*Processo de Fabricação de Pastilhas de UO<sub>2</sub>*





*Prensa*

*Forno*

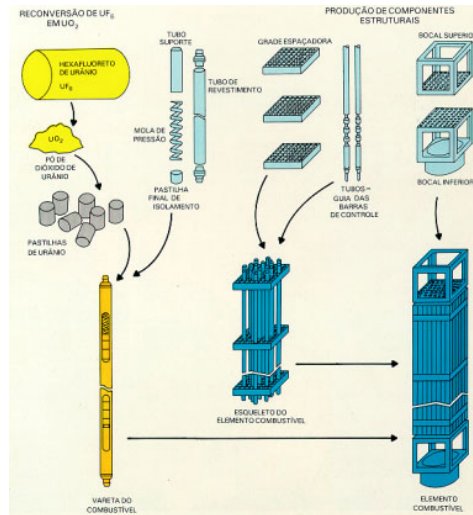


*Pastilhas*

*Medição*

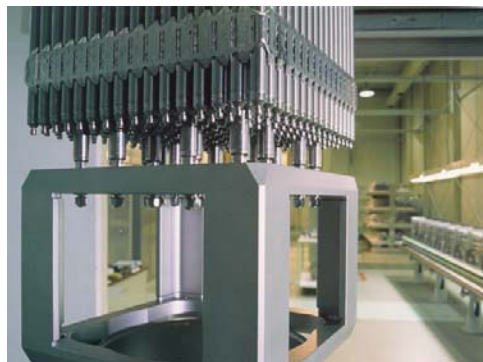
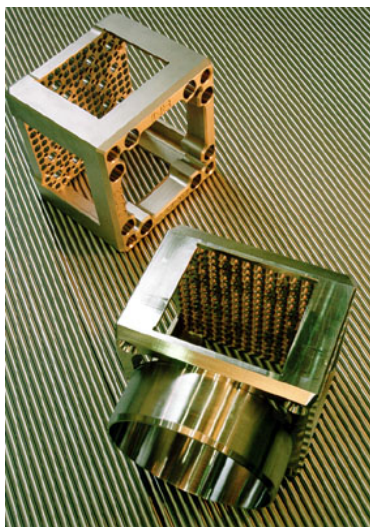


## Desenho Esquemático do Elemento Combustível



ipen

## Bocais



ipen

## Montagem

---



 ipen

## Elemento Combustível - Angra

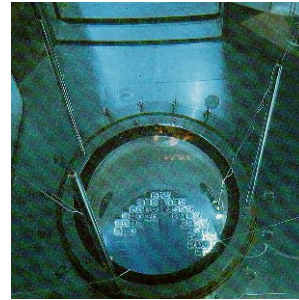
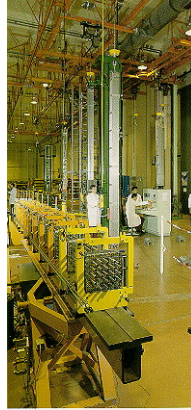
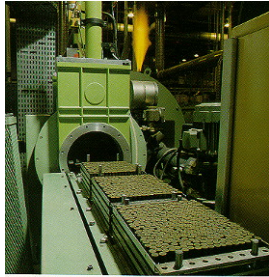
---



 ipen



## Pastilhas para o Elemento Combustível



## Componentes metálicos críticos dos sistemas nucleares

### **Fissão**

- **Revestimento do elemento combustível (Zircaloy)**, primeira barreira à liberação de produtos de fissão (interação pastilha-revestimento, fragilização por hidretos, corrosão, fluência)
- **Fronteiras de Pressão do primário (aço)**
  - Vaso de pressão do reator (fragilização)
  - Tubulação do refrigerante (corrosão sob tensão)
  - Tubos do gerador de vapor (corrosão sob tensão)

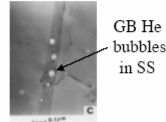
### **Propriedades Mecânicas Principais**

- **Elásticas** – módulo de Young, módulo de cisalhamento, razão de Poisson
- **Plásticas** – limite de escoamento (dureza), ductilidade, limite de resistência
- **Fluência** (*temperaturas elevadas*) – taxa, tempo de vida
- **Trincamento (fratura)**
  - fadiga (tensões cíclicas)
  - tensão constante (corrosão sob tensão)

## Cavidades e bolhas nos materiais nucleares

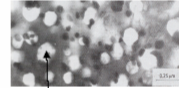
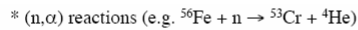
### Combustível cerâmico (UO<sub>2</sub>)

- fechamento de poros durante a fabricação da pastilha-combustível (etapa de sinterização)
- bolhas de gases de fissão (Xe, Kr) produzidas durante irradiação

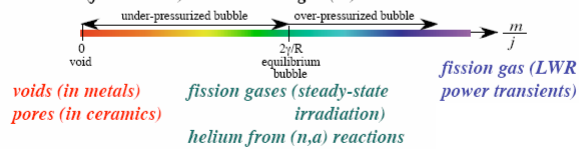


### Metais

- Vazios produzidos pela condensação de vacâncias produzidas pela irradiação
- Bolhas de Hélio produzidas por



- All cavities (*j* vacancies) contain some gas (*m*) atoms:

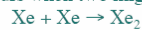


## Comportamento dos gases de fissão

### Processos básicos envolvendo bolhas de gases de fissão e átomos de gases dissolvidos:

- 1) Nucleação – átomos difundindo para formar di-átomos, que ser como embrião (núcleo) para bolhas
- 2) Crescimento – coleção de átomos de gas recém-criadas por difusão a partir do sólido para a bolha
- 3) Re-solução – átomos de Xenônio numa bolha são injetados no sólido pela passagem de um fragmento de fissão.
- 4) Coalescência – duas bolhas se juntam numa única bolha maior
- 5) Liberacão – átomos de gas escapam por difusão para contornos de grão ou superfícies livres

- Nucleation occurs when two migrating Xe atoms meet and form a di-atom cluster:

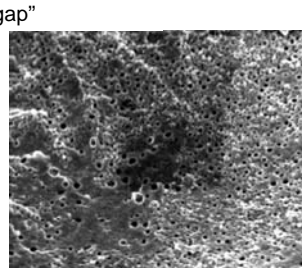


- Xe atoms created by fission either nucleate new embryo bubbles by the above reaction, or increase the size of existing (bubble embryo) clusters:



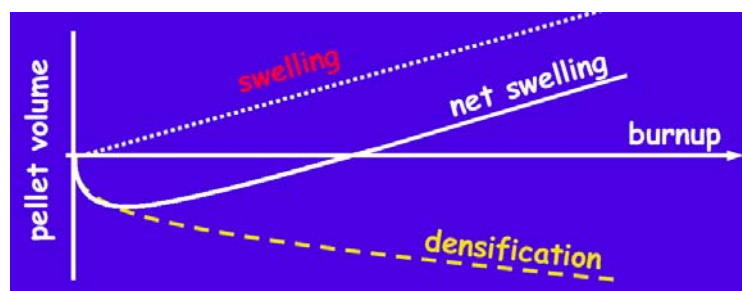
## Inchamento/Liberação de Gases de Fissão

- **Produtos de Fissão**
  - Dois átomos substituem cada átomo de U (ou Pu) que se fissiona
  - 25% dos produtos de fissão são átomos de gases (Kr, Xe)
- **Inchaço do combustível**
  - O combustível incha devido à geração de produtos de fissão
  - Átomos de gases coalescem em **bolhas**, acelerando o inchamento
  - O inchaço do combustível tende à reduzir ou fechar o “gap”
- **Liberação de Gases de Fissão**
  - Parte dos gases de fissão escapa do combustível (menos que 10%)
  - Pressionam o plenum



bolhas no combustível

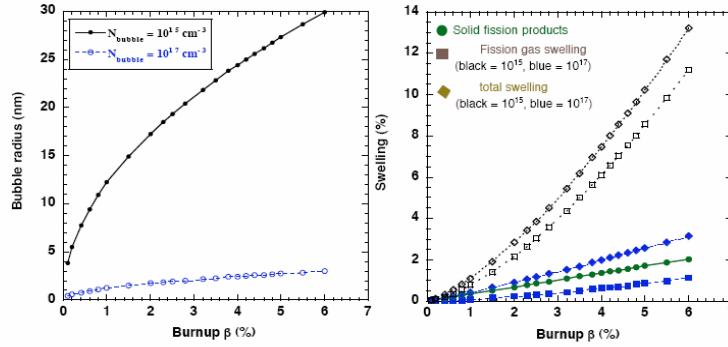
## Interação Combustível-Revestimento



- A densificação ocorre conforme os poros presentes no combustível são sinterizados
- O inchaço ocorre devido aos produtos de fissão sólidos e gasosos
- Os elementos Xe e Kr são insolúveis no UO<sub>2</sub>

## Inchamento do combustível devido aos gases de fissão

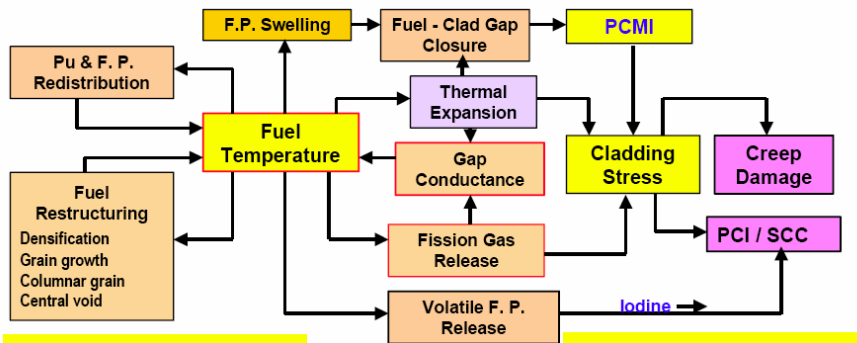
*Example of fission gas radius and swelling for no re-solution.*



*Less swelling with more numerous, but smaller bubbles!*

## Ambiente do Combustível

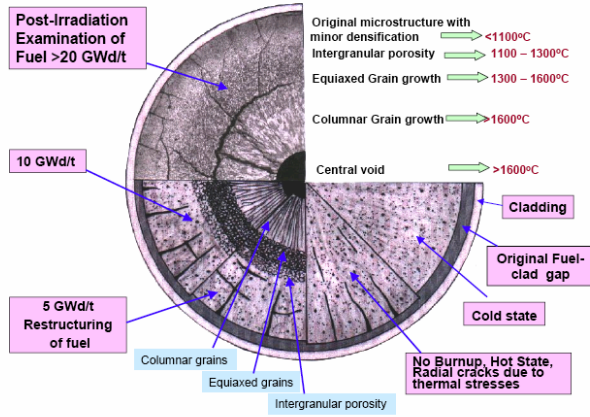
### Interactive Phenomena Operating in Fuel during Irradiation





## Ambiente do Combustível

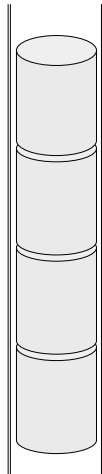
### Microstructural Evolution in Oxide Fuel



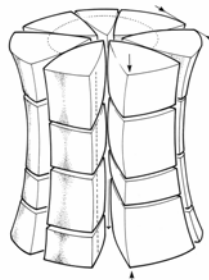
ipen

## Resposta do Combustível à Irradiação

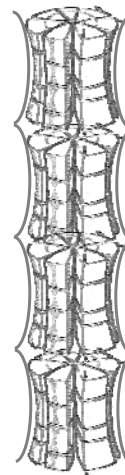
Beginning of life



Cracking due to thermal expansion coefficient differences at varying temperatures



After 1 cycle

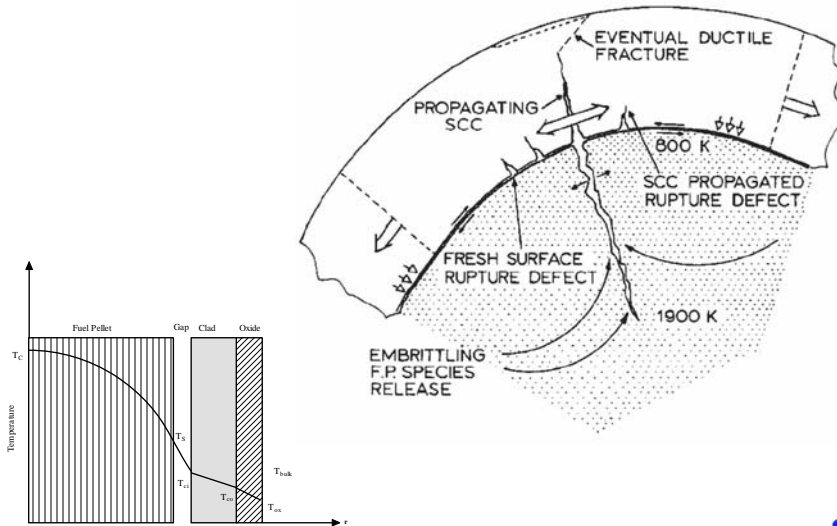


Pellets swelling  
Gaseous fission products (Xenon, Krypton...)

Density and porosity evolve with burn-up

ipen

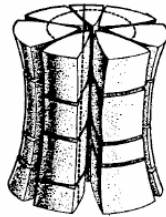
## Interação Combustível Revestimento



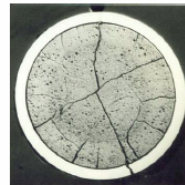
ipen

## Resposta do Combustível à Irradiação

### Pellet Clad Interaction at High Burnup

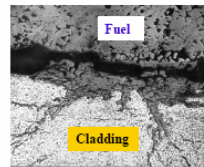
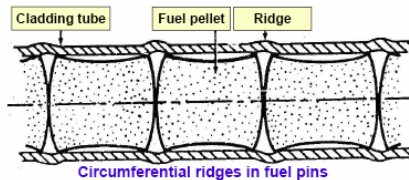


Protection against PCI/SCC failure is required for pushing the fuel burnup.



PCI/SCC Failure

Hour-glassing of fuel pellet due to radial thermal gradient



Incipient PCI/SCC cracks

ipen

## Interação Combustível-Revestimento

---

### Interação Mecânica Combustível-Encamisante (Fuel-Cladding Mechanical Interaction – FCMI)

- Inchaço do combustível e/ou contração por fluência do encamisante fecha o “gap”
- O progresso do inchaço/fluência sobrecarrega o encamisante

### Interação Química Combustível-Encamisante (Fuel-Cladding Chemical Interaction – FCCI)

- Uma vez em contato, o combustível e o encamisante podem reagir quimicamente
- A reação produz frequentemente uma camada frágil que reduz a parede do encamisante
- Conforme a parede do encamisante fica mais fina, as tensões nele aumentam



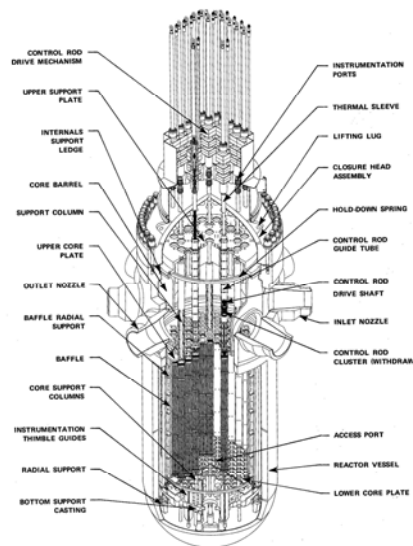
## Fenômenos Limitantes da Vida

---

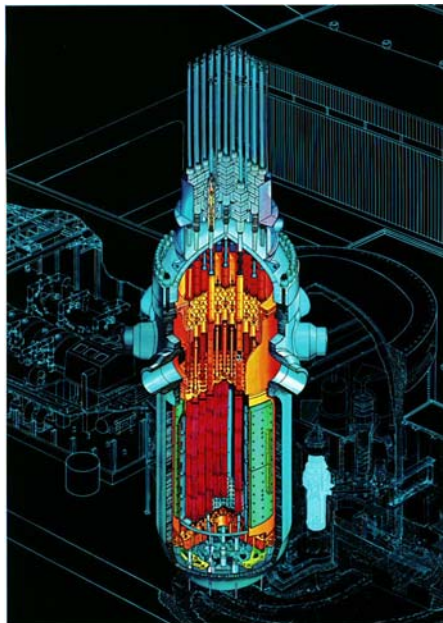
- O rompimento do encamisante (“breach”) finaliza a utilização do elemento combustível
- O rompimento do encamisante ocorre devido a:
  - Fragilização do encamisante de zircônio devido à corrosão/hidretação pelo refrigerante e tensões induzidas pelo FCMI (nos LWRs) o que **motiva o desenvolvimento de ligas resistentes à fluência para encamisante**
  - A ruptura por fluência do encamisante devido a pressurização dos gases de fissão acelerada pelo afinamento do encamisante devido à FCCI o que **motiva o desenvolvimento de ligas resistentes à fluência para encamisante**
- O limite de queima projetado para evitar a ruptura do encamisante durante a irradiação



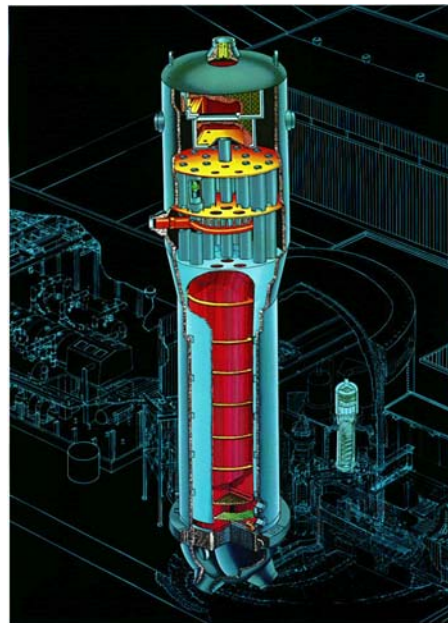
## Vaso de Pressão e internos (PWR)



 ipen



Westinghouse NUCLEAR REACTOR



Westinghouse STEAM GENERATOR

 ipen

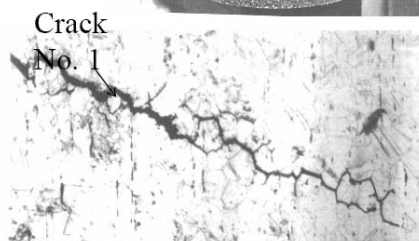
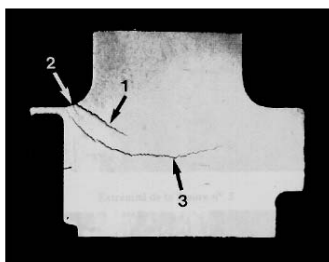
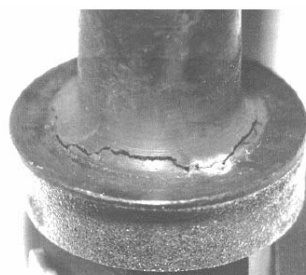
### Ambiente de serviço: reatores à água leve

#### Questões e mecanismos de degradação por envelhecimento para os internos

Componentes	Materiais	Questões sobre o envelhecimento	Mecanismos de envelhecimento
Todos os componentes	Aços inoxidáveis, ligas de Ni	Iniciação e crescimento de trincas Perda da tenacidade a fratura	Corrosão sob tensão auxiliada pela irradiação Fragilização pela Radiação
Tubos-guias, placa superior, pinos de alinhamento	Aços inoxidáveis, ligas de Ni	Perda de função	Desgaste
Parafusos: tubo-guia, suporte superior, abafador e former, coluna de suporte inferior	Aços inoxidáveis, ligas de Ni	Iniciação e crescimento de trincas Perda da pré-tensão	Corrosão sob tensão Inchaço pela radiação, fluência térmica ou devida à radiação
Colunas de suporte superior, placa e colunas de suporte inferior	Ligas fundidas, aços inoxidáveis	Perda da tenacidade a fratura	Fragilização térmica
Placa de suporte superior, bocais do barril do núcleo, placa superior do núcleo, pinos de alinhamento	Aços inoxidáveis, ligas de Ni	Dano de fadiga cumulativo	Fadiga



### CST auxiliada pela Irradiação





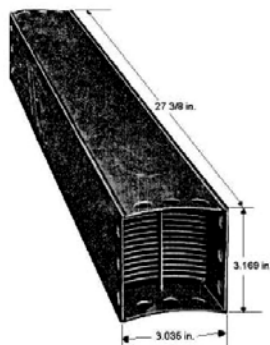
## Sumário sobre materiais e questões dos LWRs

Componente	Material	Massa	Questões
Combustível	UO <sub>2</sub> ; (U,PU)O <sub>2</sub>	100	Liberação de gases de fissão; inchaço dos produtos de fissão; redução da condutividade térmica com a queima
Encamisante, Grade espaçadora	Zircaloy: 1,5 Sn, 0,5 (Fe,Cr,Ni) , 0,1 O, bal Zr	25	Corrosão e hidretação aquosa; fragilização, crescimento; interação pastilha-revestimento; fretting
Absorvedores de neutrons	Ag-In-Cd; Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	~ 1	Nenhuma, a não ser em caso de acidente severo
Vaso de pressão do reator	Aço baixa-liga: 2 Cr, 1 Mo; bal Fe	400 - 500	Fragilização pela radiação (PWR)
Gerador de vapor (PWR)	Aço baixa-liga; Inconel: 60 Ni, 25 Cr, 15 Fe		Entupimento dos tubos; trincamento; endentação; vazamento do circuito primário para o circuito secundário
Internos do vaso	Aço Inoxidável: 18 Cr, 8Ni, bal Fe; Inconel		Inchaço/fluência; corrosão-sob-tensão; fadiga
Componentes de for a do núcleo, tubulação do primário	Aço Inoxidável		Corrosão-sob-tensão (mais em BWR)
Válvulas,	Aço inoxidável; Stellite: alto teor de Co		Dissolução do cobalto → ativação no núcleo → deposição no circuito primário

## Combustível MTR



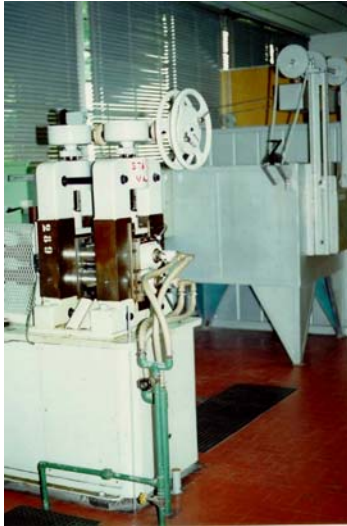
Finished MTR fuel element (Oak Ridge National Laboratory)



MTR fuel assembly of curved plates without end boxes (Oak Ridge National Laboratory)

*Laminação a Quente*

---







*Operação de Cravamento*



*Controle Dimensional*



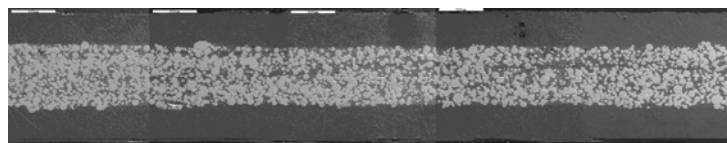
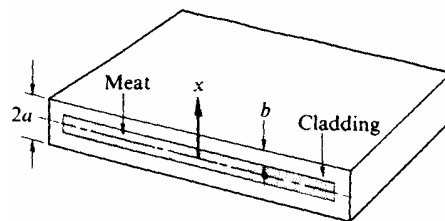
## Radiografia



ipen

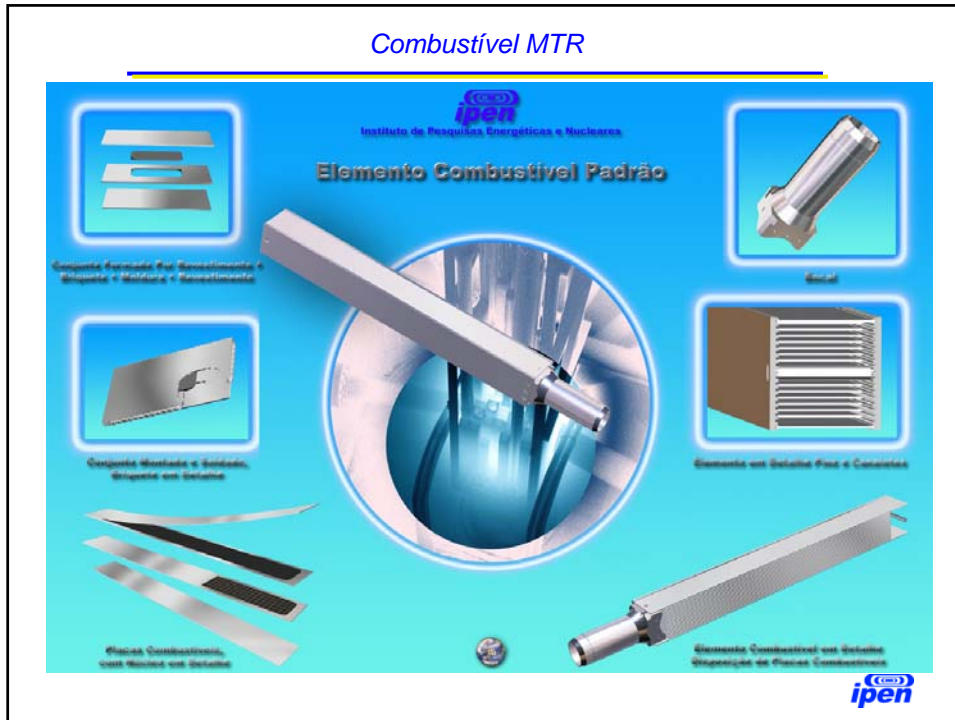
## Placa Combustível

- Plate-Type Fuels
  - Research and test reactors (HFIR, MTR, ATR)
  - Dispersion fuels (i.e., fuel particles in metal matrix)
  - No plenum



ipen

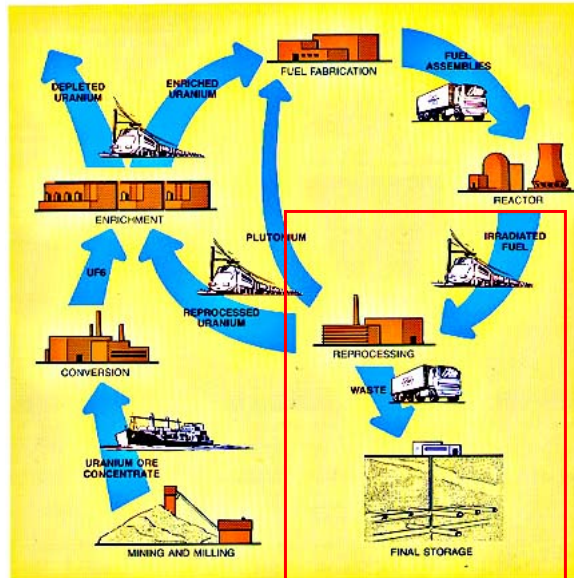
## Combustível MTR



## EC em serviço



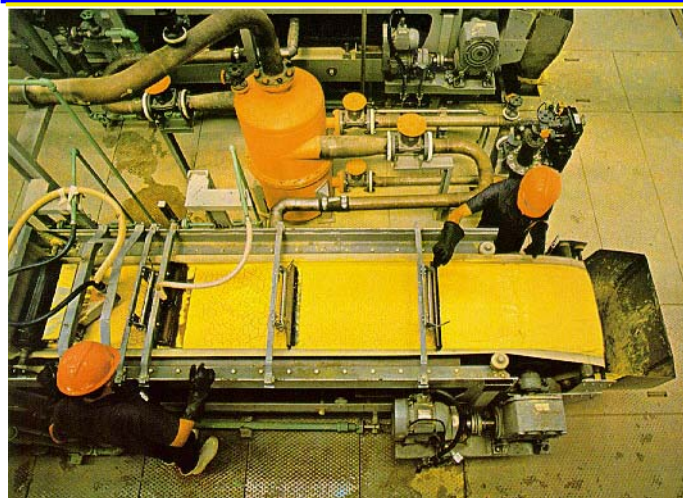
## Estágios do Ciclo do Combustível



Back-end

ipen

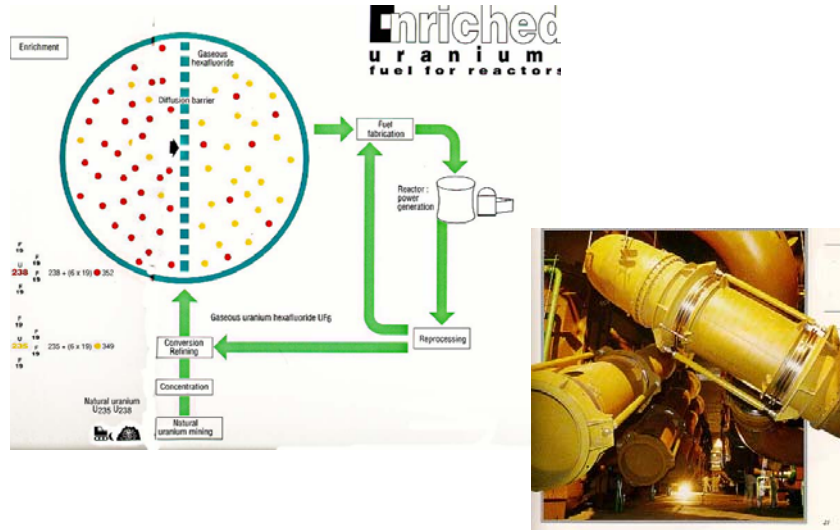
## Produção do "Yellow Cake" (Concentrado de Urânio)



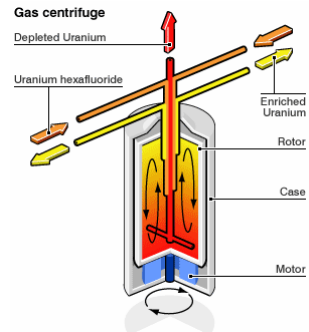
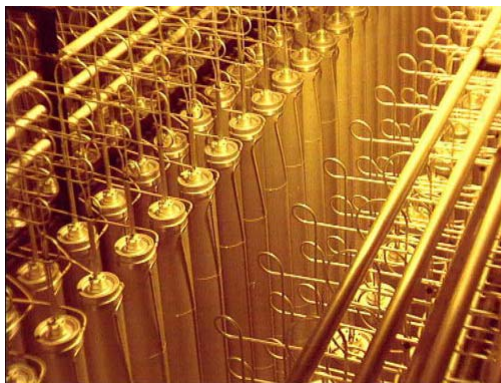
ipen

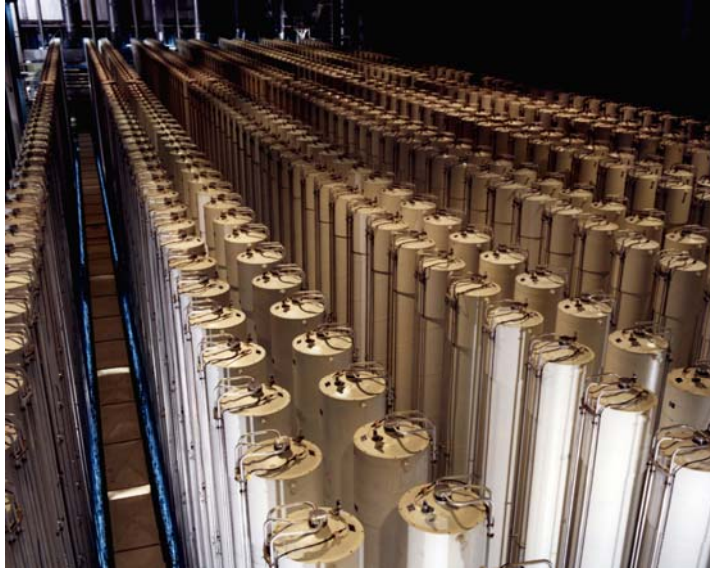


## Enriquecimento por Difusão Gasosa



## Enriquecimento por Ultracentrifugação

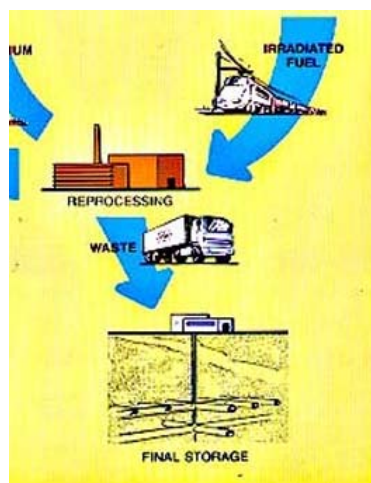




 ipen

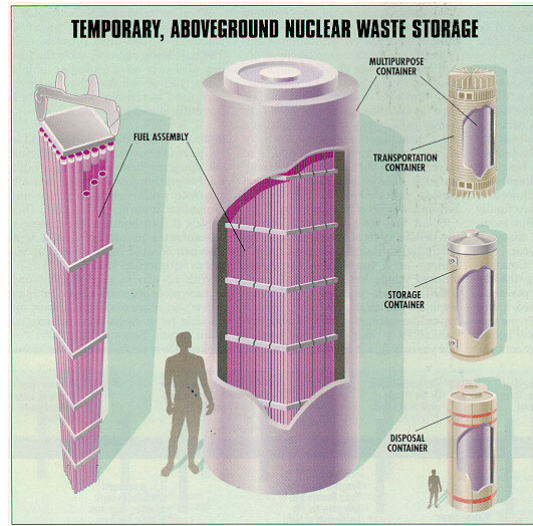
*Back-end*

---



 ipen

## Estocagem temporária do Combustível Queimado



ipen

## Imobilização de Rejeitos Nucleares

*Imobilização de Rejeitos de Baixa Atividade*

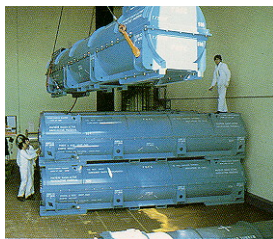
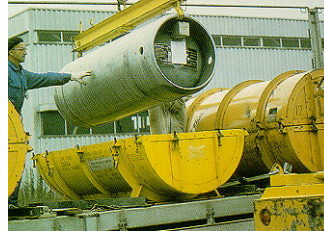


*Vitrificação de Rejeitos de Alta Atividade*

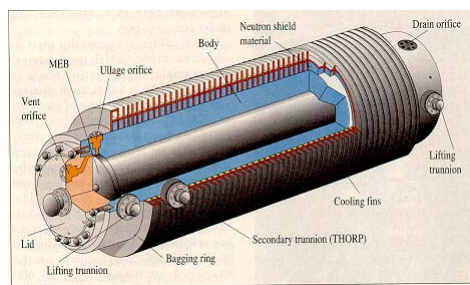


ipen

## Armazenagem e Transporte do Combustível Queimado



ipen



Casco para transporte

## Inertização do Resíduo Nuclear



ipen



## Estocagem Subterrânea Permanente

