

Ciência dos Materiais Nucleares

Desafios do projeto de novos reatores

Cláudio Geraldo Schön

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

18 de maio de 2017

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena
(grande) história
do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da
Engenharia
Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e
radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

ENERGIA

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

N. Kardashev (1964)

Civilização classe I toda a energia que incide no planeta

Civilização classe II toda a energia da própria estrela

Civilização classe III toda a energia da própria galáxia



Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

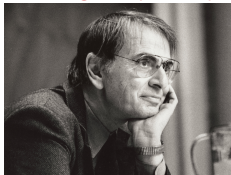
Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Escala Kardashev

Onde estamos?

C. Sagan (1973)



$$K = \frac{\log_{10} P - 6}{10} \quad (1)$$

P : Potência total utilizada pela humanidade.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

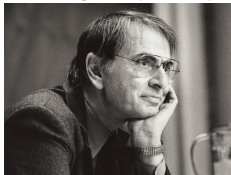
Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

C. Sagan (1973)



$$K = \frac{\log_{10} P - 6}{10} \quad (1)$$

P : Potência total utilizada pela humanidade.

Em 2015: $K = 0,7239 \downarrow$

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

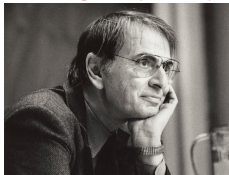
Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Escala Kardashev

Onde estamos?

C. Sagan (1973)



$$K = \frac{\log_{10} P - 6}{10} \quad (1)$$

P : Potência total utilizada pela humanidade.

Em 2015: $K = 0,7239 \downarrow$

E tudo isso preservando o meio ambiente!

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

O quê e Por quê?

Motivação

Quê?

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia

Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

us- apresentar custos de operação
re- equivalentes. O ponto, entre-
ís a tanto, não é apenas econômico.
ge- O País não pode prescindir de
por Angra 3, assim como não pode
prescindir de Belo Monte. Ne-
nifi- cessitamos de uma rede flexí-
ear. vel, em que as diferentes partes
re- possam compensar deficiên-
ção çias de fornecimento em situa-
ear ções de emergência.
de Há, entretanto, uma fonte de
asil. vulnerabilidade. O Brasil care-

Fonte: C. G. Schön, *O Estado de São Paulo*, 1/06/2015, p. A2

Motivação

Desafios

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- ▶ Tecnologias de petróleo e gás natural
- ▶ Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- ▶ Tecnologias nucleares

Motivação

Desafios

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia

Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- ▶ **Tecnologias de petróleo e gás natural**
- ▶ Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- ▶ Tecnologias nucleares



Centro de Pesquisa
para Inovação em Gás

Motivação

Desafios

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena
(grande) história
do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da
Engenharia
Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e
radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- ▶ Tecnologias de petróleo e gás natural
- ▶ **Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica**
- ▶ Tecnologias nucleares

Motivação

Desafios

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia

Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- ▶ Tecnologias de petróleo e gás natural
- ▶ Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- ▶ Tecnologias nucleares
 - ▶ Fissão nuclear
 - ▶ Fusão nuclear

Motivação

Desafios

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- ▶ Tecnologias de petróleo e gás natural
- ▶ Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- ▶ Tecnologias nucleares
 - ▶ Fissão nuclear
 - ▶ Fusão nuclear

Motivação

Questões

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- ▶ Tecnologias de petróleo e gás natural
- ▶ Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- ▶ Tecnologias nucleares
 - ▶ Fissão nuclear
 - ▶ Fusão nuclear

Desafios nos fundamentos e na tecnologia

Motivação

Desafios

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena
(grande) história
do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da
Engenharia
Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e
radiação

Desenvolvimentos

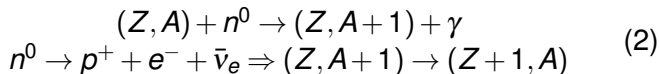
Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Nucleosíntese do Urânio

Urânio \rightarrow fase de expansão da onda de choque em explosões de supernovas tipo II (colapso de núcleo) pelo processo de absorção rápida de nêutrons (*r-process*, $\rho_n \approx 10^{23} \text{ cm}^{-3}$):



SN 1987A

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Entre 11 e 5 bilhões de anos antes da formação do sistema solar, múltiplos eventos de supernovas enriqueceram o meio interestelar em elementos mais pesados que o Ferro (incluindo Urânio).

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Entre 11 e 5 bilhões de anos antes da formação do sistema solar, múltiplos eventos de supernovas enriqueceram o meio interestelar em elementos mais pesados que o Ferro (incluindo Urânio).
Como os astrofísicos sabem disso?

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Entre 11 e 5 bilhões de anos antes da formação do sistema solar, múltiplos eventos de supernovas enriqueceram o meio interestelar em elementos mais pesados que o Ferro (incluindo Urânio).

Como os astrofísicos sabem disso?

- ▶ **Cronologia: razão U/Pb (depende da eficiência do *r-process*).**
- ▶ Múltiplos eventos: heterogeneidade da composição das estrelas do halo galáctico.

Fonte: D. J. Clayton *Astrophys. J.* **139** (1964) 637 – 663.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Entre 11 e 5 bilhões de anos antes da formação do sistema solar, múltiplos eventos de supernovas enriqueceram o meio interestelar em elementos mais pesados que o Ferro (incluindo Urânio).

Como os astrofísicos sabem disso?

- ▶ Cronologia: razão U/Pb (depende da eficiência do *r-process*).
- ▶ Múltiplos eventos: heterogeneidade da composição das estrelas do halo galáctico.

Fonte: Sneden *et. al.*, *Astrophys. J.* **533** (2000) L139 – L142.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Urânio: formação e composição da Terra

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

- ▶ Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural), só $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U} \rightarrow 8$ de 44 TW.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Medidas de neutrinos, fonte: The KamLAND Collab. *Nature Geoscience* 4 (2011) 647 – 651.

Urânio: formação e composição da Terra

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

- ▶ Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural), $U + Th + K \rightarrow 20$ de 44 TW.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Medidas de neutrinos, fonte: The KamLAND Collab. *Nature Geoscience* 4 (2011) 647 – 651.

Urânio: formação e composição da Terra

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

- ▶ Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural), $U + Th + K \rightarrow 20$ de 44 TW.
- ▶ Hipótese: há um reator nuclear no centro da Terra (+2 TW).

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Medidas de neutrinos, fonte: The KamLAND Collab. *Nature Geoscience* 4 (2011) 647 – 651.

Urânio: formação e composição da Terra

- ▶ Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural), $U + Th + K \rightarrow 20$ de 44 TW.
- ▶ Hipótese: há um reator nuclear no centro da Terra (+2 TW).
- ▶ Na crosta terrestre: disseminado (amplamente em pequenas quantidades, pois o Urânio é litófilo).

Fonte: A. N. Holden, *Physical Metallurgy of Uranium*, Reading-MA: Addison-Wesley Pub. Co., 1958.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Urânio: formação e composição da Terra

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

- ▶ Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural), $U + Th + K \rightarrow 20$ de 44 TW.
- ▶ Hipótese: há um reator nuclear no centro da Terra (+2 TW).
- ▶ Na crosta terrestre: disseminado (amplamente em pequenas quantidades, pois o Urânio é litófilo).
- ▶ Isolado por M. Klaproth (1789) \rightarrow propriedades físico-químicas peculiares

Fonte: A. N. Holden, *Physical Metallurgy of Uranium*, Reading-MA: Addison-Wesley Pub. Co., 1958.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

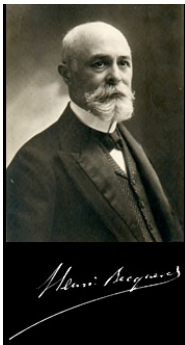
Síntese

Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908)

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

Estudava a fosforescência de um sal de Urânio —
 $K_2(UO_2)(SO_4)_2$.



~~se voula pas par une exposition au Soleil, devant une journée.~~

» On pose sur la feuille de papier, à l'extérieur, une plaque de la substance phosphorescente, et l'on expose le tout au Soleil, pendant plusieurs heures. Lorsqu'on développe ensuite la plaque photographique, on reconnaît que la silhouette de la substance phosphorescente apparaît en noir sur le cliché. Si l'on interpose entre la substance phosphorescente et le papier une pièce de monnaie, ou un écran métallique percé d'un dessin à jour, on voit l'image de ces objets apparaître sur le cliché.

~~On peut répéter les mêmes expériences en interposant entre la sub-~~

Fonte: H. Becquerel, *Comptes Rendus* **122** (1896) 420 – 421.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena
(grande) história
do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da
Engenharia
Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e
radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

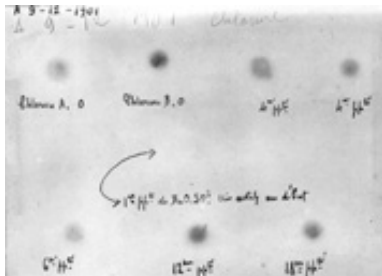
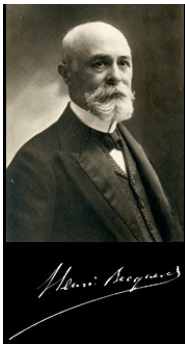
Síntese

Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908)

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

Estudava a fosforescência de um sal de Urânio —
 $K_2(UO_2)(SO_4)_2$.



Fonte: H. Becquerel, *Mem. Acad. Sciences Institut de France* **46** (1903).

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

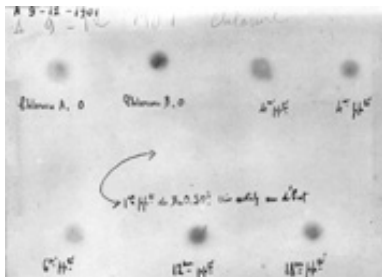
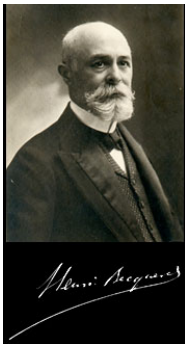
Síntese

Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908)

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

Estudava a fosforescência de um sal de Urânio —
 $K_2(UO_2)(SO_4)_2$.



Fonte: **Radioatividade**: M. Curie, *Compte Rendus* **126** (1898) 1101 – 1103.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

$$A \approx 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick):
prótons e elétrons estão combinados em pares no
núcleo.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

$$A \approx 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick):
prótons e elétrons estão combinados em pares no
núcleo.

Radiação misteriosa emitida por Be e B após irradiação
por partículas α de uma fonte de Po.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

$$A \approx 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick):
prótons e elétrons estão combinados em pares no
núcleo.

Radiação misteriosa emitida por Be e B após irradiação
por partículas α de uma fonte de Po.

- ▶ Hipótese inicial: suposto γ teria energia cinética
irreal.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

$$A \approx 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick):
prótons e elétrons estão combinados em pares no
núcleo.

Radiação misteriosa emitida por Be e B após irradiação
por partículas α de uma fonte de Po.

- ▶ Hipótese inicial: suposto γ teria energia cinética irreal.
- ▶ Resultados de Curie e Joliot: essa radiação era capaz de extrair prótons de materiais contendo hidrogênio (parafina).

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

$$A \approx 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick):
prótons e elétrons estão combinados em pares no
núcleo.

Radiação misteriosa emitida por Be e B após irradiação
por partículas α de uma fonte de Po.

- ▶ Hipótese inicial: suposto γ teria energia cinética irreal.
- ▶ Resultados de Curie e Joliot: essa radiação era capaz de extrair prótons de materiais contendo hidrogênio (parafina).
- ▶ Chadwick demonstrou que essa estranha radiação era uma partícula sem carga, mas com massa aproximadamente igual à do próton \rightarrow o nêutron.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

- ▶ Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

- ▶ Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- ▶ Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia

Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

- ▶ Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- ▶ Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)
- ▶ Urânio, como o elemento de maior número atômico, era preferido nesses experimentos

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia

Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

- ▶ Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- ▶ Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)
- ▶ Urânio, como o elemento de maior número atômico, era preferido nesses experimentos
- ▶ Hahn e Meitner se destacavam (trinta anos de trabalhos conjuntos), mas ela teve que fugir para a Suécia em 1938

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

- ▶ Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- ▶ Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)
- ▶ Urânio, como o elemento de maior número atômico, era preferido nesses experimentos
- ▶ Hahn e Meitner se destacavam (trinta anos de trabalhos conjuntos), mas ela teve que fugir para a Suécia em 1938
- ▶ Hahn tem a primazia da descoberta da fissão

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

- ▶ Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- ▶ Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)
- ▶ Urânio, como o elemento de maior número atômico, era preferido nesses experimentos
- ▶ Hahn e Meitner se destacavam (trinta anos de trabalhos conjuntos), mas ela teve que fugir para a Suécia em 1938
- ▶ Hahn tem a primazia da descoberta da fissão
- ▶ Meitner deu uma clara interpretação (e definiu o nome)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Leo Szilárd (1898 – 1964)

- ▶ Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Leo Szilárd (1898 – 1964)

- ▶ Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura
- ▶ Desenvolveu o conceito de massa crítica e previu o uso em energia e em aplicações militares

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Leo Szilárd (1898 – 1964)

- ▶ Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura
- ▶ Desenvolveu o conceito de massa crítica e previu o uso em energia e em aplicações militares
- ▶ Publicou tudo em patentes (ele deteve a patente da produção de energia por reações nucleares)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

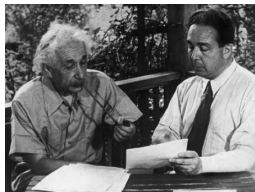
Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Leo Szilárd (1898 – 1964)

- ▶ Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura
- ▶ Desenvolveu o conceito de massa crítica e previu o uso em energia e em aplicações militares
- ▶ Publicou tudo em patentes (ele deteve a patente da produção de energia por reações nucleares)
- ▶ Foi responsável pela carta de Einstein a Roosevelt



Fonte: Atomic Heritage Foundation

<http://www.atomicheritage.org/key-documents/einstein-szilard-letter>

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

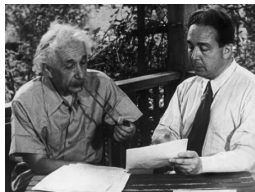
Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Leo Szilárd (1898 – 1964)

- ▶ Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura
- ▶ Desenvolveu o conceito de massa crítica e previu o uso em energia e em aplicações militares
- ▶ Publicou tudo em patentes (ele deteve a patente da produção de energia por reações nucleares)
- ▶ Foi responsável pela carta de Einstein a Roosevelt
→ **Projeto Manhattan**



Fonte: Atomic Heritage Foundation

<http://www.atomicheritage.org/key-documents/einstein-szilard-letter>

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Enrico Fermi (1901 – 1953)

Por volta de 1939 - 1940 → nêutrons são produtos de fissão do Urânio → reação em cadeia de Szilárd.

Enrico Fermi construiu o primeiro reator artificial da história (Chicago Pile 1, projeto Manhattan, 2/12/1942)



(Quarta camada)

Fonte: Atomic Heritage Foundation, Chicago-IL

(<http://www.atomicheritage.org/location/chicago-il>)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

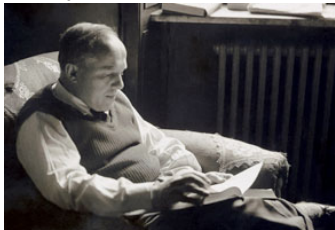
Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

1934 - 1937: Criação da Universidade de São Paulo (e da FFCL) → Gleb Wathagin, Mário Schönberg, Marcello Damy de Souza Santos.



Gleb Wathagin

Fonte: N. Marcolin, Revista Pesquisa FAPESP, Ed. 195, maio 2012.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

E no Brasil?

1947: Almirante Álvaro Alberto de Mota e Silva →
Criação do CNPq para impulsionar a pesquisa nuclear
(núcleo da CNEN).



Almirante Álvaro Alberto

Fonte: Instituto Histórico e Geográfico de Sorocaba.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

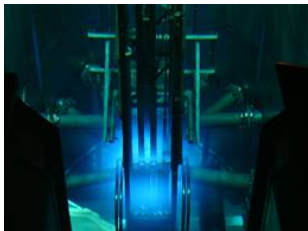
Síntese

Primeiros reatores de pesquisa:

1957 IEA-R1 → IPEN

1960 TRIGA Mark 1 (UFMG) → produção de radioisótopos

1962 Argonauta (IEN, Rio de Janeiro) → primeiro reator construído no Brasil



Núcleo do reator IEA-R1

J. P. N. Cárdenas, CRPq/IPEN.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena
(grande) história
do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da
Engenharia
Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e
radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

E no Brasil?

A partir de 1974: Operação comercial (e programa paralelo)

- 1974 - 1975 Criação da Nuclebrás (atual INB) e assinatura do tratado Brasil - Alemanha
- 1978 Início do “Programa Paralelo” (núcleo do PROSUB)
- 1982 - 1985 Início de operação de Angra 1 (tecnologia da Westinghouse) e anúncio do domínio do ciclo completo
- 1990 Lacração da Serra do Cachimbo
- 2000 - 2001 Início das operações de Angra 2 (tecnologia da Siemens - KWU) e Fábrica de Combustível Nuclear (FCN, Resende-RJ)
- 2010 Início da construção de Angra 3
- jan 2015 Apagão devido aos reservatórios vazios

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

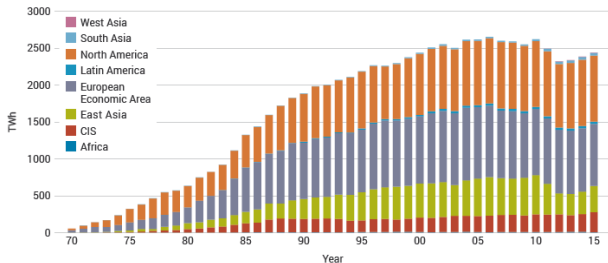
Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Evolução da produção de energia nuclear

Participação atual na matrix mundial: 11 % (era 13% em 2009).

Nuclear Electricity Production



Source: IAEA PRIS

1979: Three Miles Island

Fonte: World Nuclear Association.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

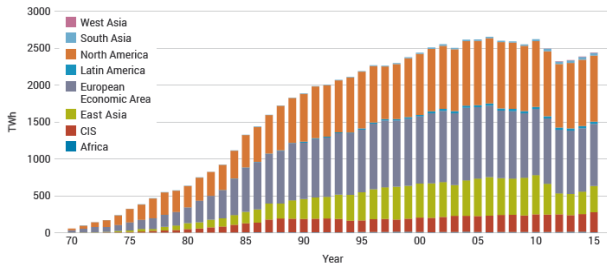
Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Evolução da produção de energia nuclear

Participação atual na matrix mundial: 11 % (era 13% em 2009).

Nuclear Electricity Production



Source: IAEA PRIS

1979: Three Miles Island
1986: Chernobyl

Fonte: World Nuclear Association.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

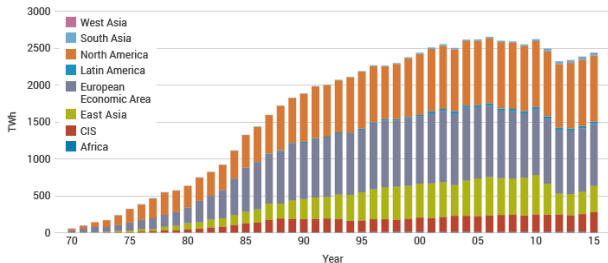
Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Evolução da produção de energia nuclear

Participação atual na matrix mundial: 11 % (era 13% em 2009).

Nuclear Electricity Production



Source: IAEA PRIS

1979: Three Miles Island

1986: Chernobyl

2011: Fukushima

Fonte: World Nuclear Association.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Desafios

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Novos projetos de reatores

- ▶ Reatores com tolerância a acidentes (Geração IV)

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena
(grande) história
do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da
Engenharia
Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e
radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Novos projetos de reatores

- ▶ Reatores com tolerância a acidentes (Geração IV)
- ▶ Reatores para propósitos especiais

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena
(grande) história
do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da
Engenharia
Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e
radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

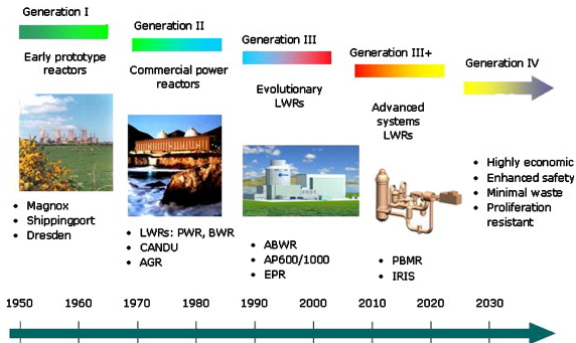
Síntese

Reatores de Geração IV

Consórcio internacional (2001)

Brasil participa como membro não signatário.

- ▶ Reatores térmicos (nêutrons são moderados)
- ▶ Reatores rápidos (nêutrons não são moderados, possibilidade de “queima” de actinídeos)



Fonte: T. Abram, S. Ion, Energy Policy 36 (2008) 4323 – 4330.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

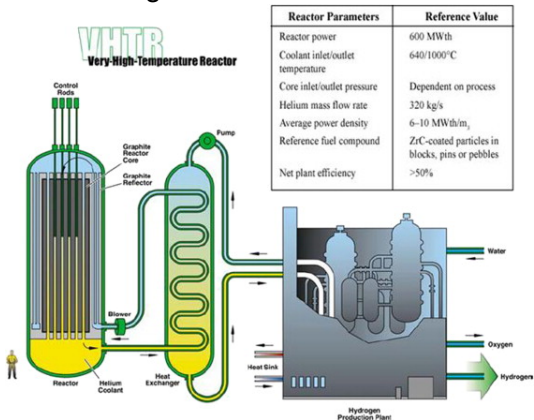
Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Reatores térmicos

Reator de ultra alta temperatura, VHTR

Fluído refrigerante: Hélio.



Fonte: T. Abram, S. Ion, Energy Policy **36** (2008) 4323 – 4330.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

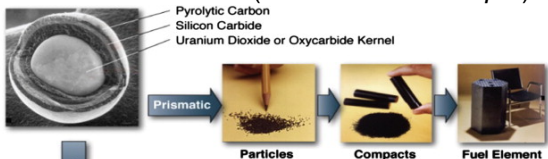
Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

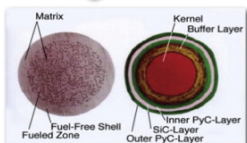
Reatores térmicos

Reator de ultra alta temperatura, VHTR

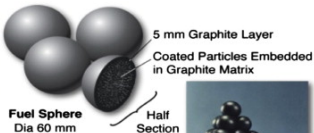
Combustível TRISO (*tristructural isotropic*)



TRISO-coated fuel particles (left) are formed into fuel compacts (center) and inserted into graphite fuel elements (right) for the prismatic reactor



TRISO-coated fuel particles are formed into fuel spheres for pebble bed reactor



08-GA50711-01

Fonte: P. Sabharval *et al.*, Energy Conv. Management **74** (2013) 574 – 581.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

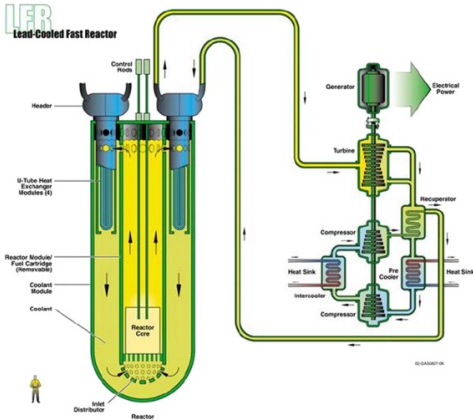
Síntese

Reatores rápidos

Reator resfriado a Chumbo, LFR

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön



Produz Polônio no líquido refrigerante → Termodinâmica do sistema
Bi – Pb – Po (*ab initio*).

Projeto CNPq-FWO (Bélgica): C. G. Schön, H. M. Petrilli (USP), S. Cottenier (U. Ghent).

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

- ▶ Reatores para produção de radiofármacos (RMB, IPEN)
- ▶ Reatores compactos (Pesquisa, propulsão)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Reatores para propósitos especiais

- ▶ Reatores para produção de radiofármacos (RMB, IPEN)
- ▶ Reatores compactos (Pesquisa, propulsão)

C. G. Schön, M. A. Tunes, V. O. Santos, Projeto Escola Politécnica - Marinha do Brasil.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

O caso brasileiro

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön



Produção de energia (diversificação da matriz) e produção de radiofármacos.

<https://www.noticiasao minuto.com.br/tech/323887/angra-3-e-reator-multiproposito-sao-prioridades-para-2017>

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

O caso brasileiro

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese



É a 5ª reserva mundial de Urânio: Austrália (28,7%), Cazaquistão (11,2%), Canadá (8,3%), Rússia (8,3%), **Brasil (5,3%)**.

http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/outras_fontes/10_2_3.htm

<http://www.inb.gov.br/pt-br/Detailhe/Conteudo/>

[inb-quer-retomar-producao-de-uranio-em-2017-e-busca-novas-parcerias/Origem/394](http://www.inb.gov.br/pt-br/Detailhe/Conteudo/inb-quer-retomar-producao-de-uranio-em-2017-e-busca-novas-parcerias/Origem/394)

O caso brasileiro

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön



Detém a tecnologia de enriquecimento (ciclo completo).

<http://diariodovale.com.br/economia/inb-produz-mais-uma-recarga-de-angra-2/>

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico mondrítico

Síntese

Radiação: *s. f.* **1** Ato ou efeito de radiar, radiância **2** FÍS emissão de energia por meio de ondas ou partículas.

Fonte: Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

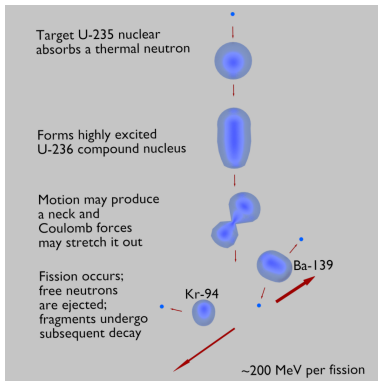
Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Radiação produzida na fissão do Urânio

Modelo da gota líquida (Gamow)



Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

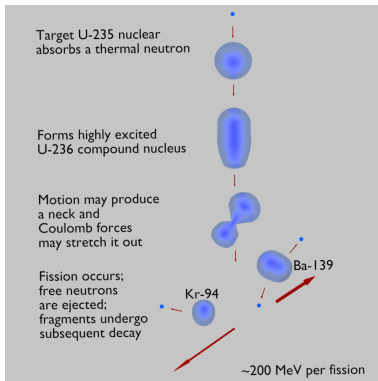
Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Radiação produzida na fissão do Urânio

Modelo da gota líquida (Gamow)



$$\langle E_n \rangle \approx 2 \text{ MeV}$$

$$\langle E_\gamma \rangle \approx 7 \text{ MeV}$$

$$\langle E_{Kr+} \rangle \approx 150 \text{ MeV}$$

Fonte: J.J. Duderstadt, L. J. Hamilton *Nuclear reactor analysis* 84 New York:Wiley, 1976.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Radiação:

- ▶ Colisão elástica → deslocamento de átomos, aquecimento

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Radiação:

- ▶ Colisão elástica → deslocamento de átomos, aquecimento
- ▶ Colisão inelástica

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Radiação:

- ▶ Colisão elástica → deslocamento de átomos, aquecimento
- ▶ Colisão inelástica
 - ▶ Absorção pelo núcleo ou pela eletrosfera (produção de estados excitados)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia

Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Radiação:

- ▶ Colisão elástica → deslocamento de átomos, aquecimento
- ▶ Colisão inelástica
 - ▶ Absorção pelo núcleo ou pela eletrosfera (produção de estados excitados)
 - ▶ Alteração da estrutura de moléculas (produção de radicais livres, ligações cruzadas, foto-oxidação ...)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Radiação:

- ▶ Colisão elástica → deslocamento de átomos, aquecimento
- ▶ Colisão inelástica
 - ▶ Absorção pelo núcleo ou pela eletrosfera (produção de estados excitados)
 - ▶ Alteração da estrutura de moléculas (produção de radicais livres, ligações cruzadas, foto-oxidação ...)
 - ▶ Produção de reações nucleares

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

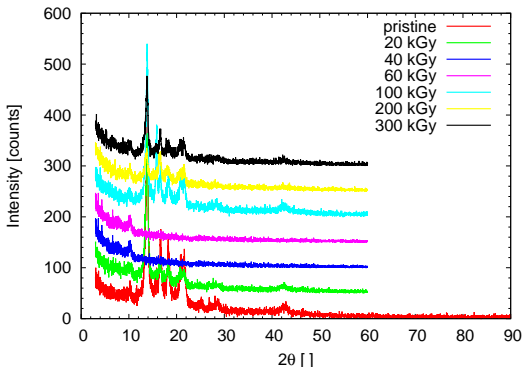
Síntese

Exemplo de aplicação prática (intencional)

Irradiação de PP por feixe de elétrons

$\langle E_{e^-} \rangle = 150 \text{ keV}$.

Alteração das propriedades, esterilização.



Fonte: E. A. Maeda, A. F. Santos, L. G. A. Silva, C. G. Schön, *Mater. Chem. Phys.* **169** (2016) 55 – 61.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

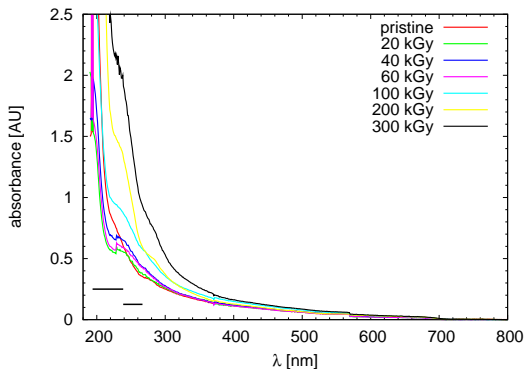
Síntese

Exemplo de aplicação prática (intencional)

Irradiação de PP por feixe de elétrons

$$\langle E_{e^-} \rangle = 150 \text{ keV.}$$

Alteração das propriedades, esterilização.



Fonte: E. A. Maeda, A. F. Santos, L. G. A. Silva, C. G. Schön, *Mater. Chem. Phys.* **169** (2016) 55 – 61.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

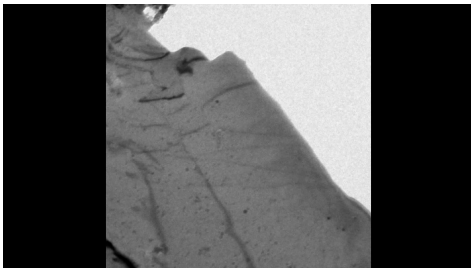
Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Exemplo de aplicação prática (incidental)

Cladding de aço inoxidável AISI 348

Irradiação *in situ* com feixe de Xe^- (30 keV) em microscópio eletrônico de transmissão - Jeol 2000FX.



- ▶ $T = 573K$ (300°C)
- ▶ Espessura da lâmina fina: 52 nm
- ▶ Dano inicial: 38 dpa
- ▶ Dano final: 50 dpa

Fonte: Matheus A. Tunes (National Ion Beam Centre - UK Associated Universities, Manchester).

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

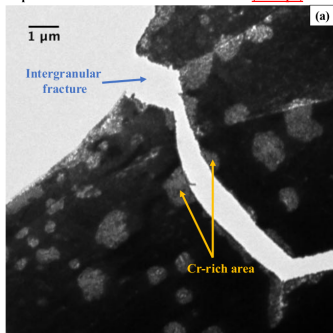
Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

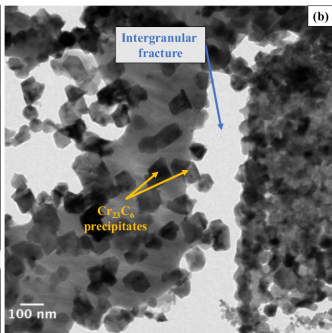
Exemplo de aplicação prática (incidental)

Cladding de aço inoxidável AISI 348

Experiment #1: 1073 K with 30 keV Xe⁺ ions (130 dpa)



Low-mag BFTEM image



30k BFTEM image underfocused

- ▶ $T = 1073\text{K}$ (800°C)
- ▶ Espessura da lâmina fina: 52 nm
- ▶ Xe⁺ (30 keV)
- ▶ Dano: 130 dpa

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Exemplo de aplicação prática (incidental)

Cladding de aço inoxidável AISI 348

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

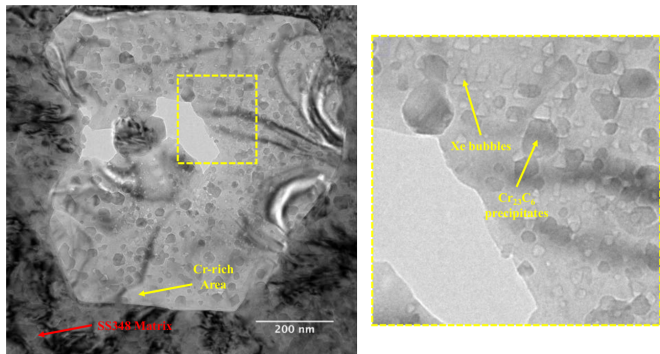
Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

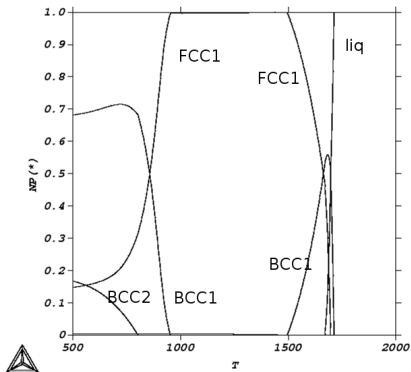


40k BFTEM image underfocused

- ▶ $T = 1073\text{K}$ (800°C)
- ▶ Espessura da lâmina fina: 52 nm
- ▶ Xe^+ (30 keV)
- ▶ Dano: 130 dpa

Aço AISI348

Hipótese



C. G. Schön, M. A. Tunes: SGTE Solid Solution 2.0.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

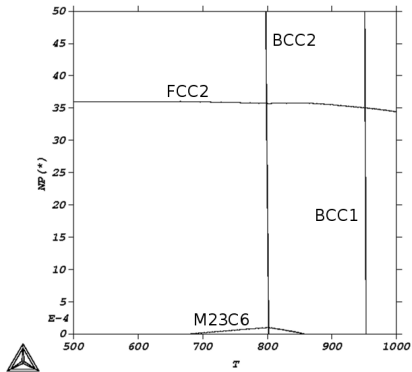
Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Aço AISI348

Hipótese



C. G. Schön, M. A. Tunes: SGTE Solid Solution 2.0.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desenvolvimentos

Otimização de blindagens

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia

Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

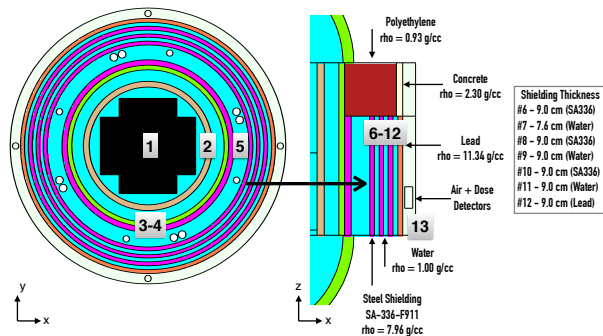
Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Otimização de blindagem de reatores compactos

Modelo de reator PWR



Monte Carlo: MCNP5

Blindagem (1d, determinístico): GEM/EVENT

Fonte: M. A. Tunes, C. R. E. de Oliveira, C. G. Schön, *Nuc. Eng. Design* **313** (2017) 20 – 28.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

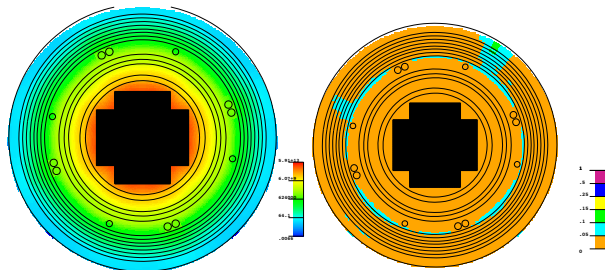
Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Otimização de blindagem de reatores compactos

Modelo de reator PWR



Monte Carlo: MCNP5

Blindagem (1d, determinístico): GEM/EVENT

Fonte: M. A. Tunes, C. R. E. de Oliveira, C. G. Schön, *Nuc. Eng. Design* **313** (2017) 20 – 28.

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena
(grande) história
do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da
Engenharia
Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e
radiação

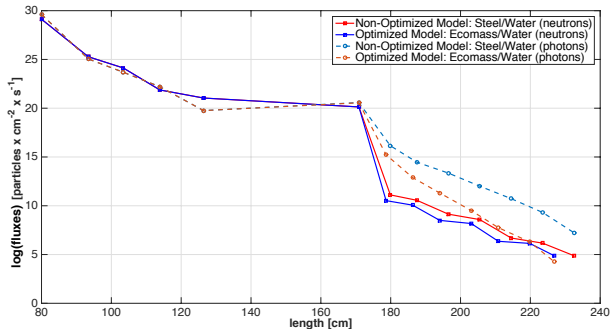
Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Otimização da blindagem



Fonte: M. A. Tunes, C. R. E. de Oliveira, C. G. Schön, *Nuc. Eng. Design* **313** (2017) 20 – 28.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Combustível

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Características do combustível metálico

- ▶ Máxima densidade de Urânio → criticalidade com menor enriquecimento ✓
- ▶ Alta condutividade térmica
- ▶ Conformabilidade
- ▶ α -U é anisotrópico → ligas (Mo, Zr, Nb) para estabilizar γ -U
- ▶ Gases de fissão → Inchamento (*Swelling*)

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.* **488** (2017) 173 – 180

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.*, (2017) submitted.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Características do combustível metálico

- ▶ Máxima densidade de Urânio → criticalidade com menor enriquecimento ✓
- ▶ Alta condutividade térmica ✓
- ▶ Conformabilidade
- ▶ α -U é anisotrópico → ligas (Mo, Zr, Nb) para estabilizar γ -U
- ▶ Gases de fissão → Inchamento (*Swelling*)

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.* **488** (2017) 173 – 180

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.*, (2017) submitted.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Características do combustível metálico

- ▶ Máxima densidade de Urânio → criticalidade com menor enriquecimento ✓
- ▶ Alta condutividade térmica ✓
- ▶ Conformabilidade ✓
- ▶ α -U é anisotrópico → ligas (Mo, Zr, Nb) para estabilizar γ -U
- ▶ Gases de fissão → Inchamento (*Swelling*)

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.* **488** (2017) 173 – 180

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.*, (2017) submitted.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Características do combustível metálico

- ▶ Máxima densidade de Urânio → criticalidade com menor enriquecimento ✓
- ▶ Alta condutividade térmica ✓
- ▶ Conformabilidade ✓
- ▶ α -U é anisotrópico → ligas (Mo, Zr, Nb) para estabilizar γ -U ✗
- ▶ Gases de fissão → Inchamento (*Swelling*)

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.* **488** (2017) 173 – 180

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.*, (2017) submitted.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Características do combustível metálico

- ▶ Máxima densidade de Urânio → criticalidade com menor enriquecimento ✓
- ▶ Alta condutividade térmica ✓
- ▶ Conformabilidade ✓
- ▶ α -U é anisotrópico → ligas (Mo, Zr, Nb) para estabilizar γ -U ✗
- ▶ Gases de fissão → Inchamento (*Swelling*) ✗

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.* **488** (2017) 173 – 180

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.*, (2017) submitted.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena
(grande) história
do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da
Engenharia
Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e
radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

▶ U – 10 Mo

EUA: Idaho National Laboratory (Dennis Keiser Jr), Los Alamos Nacional Laboratory, Argonne National Laboratory.

Argentina: Centro Atômico Constituyentes (Enrique E. Pasqualini).

Rússia: Bochvar Institute (A. V. Vatulin).

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Ligas de Urânio para combustível

Ciência dos
Materiais
Nucleares

C. G. Schön

- ▶ U – 10 Mo
- ▶ U – Nb – Zr

Índia: Bhabha Atomic Research Centre (K. Ghoshal)

Brasil: Centro Tecnológico da Marinha - Aramar (Angelo F. Padilha, Cláudio G. Schön)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Ligas de Urânio para combustível

- ▶ U – 10 Mo
- ▶ U – Nb – Zr
- ▶ U – Mo – Zr

Brasil: Centro Tecnológico da Marinha - Aramar (Angelo F. Padilha, Cláudio G. Schön)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Ligas de Urânio para combustível

- ▶ U – 10 Mo
- ▶ U – Nb – Zr
- ▶ U – Mo – Zr

Brasil: Centro Tecnológico da Marinha - Aramar (Angelo F. Padilha, Cláudio G. Schön)

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

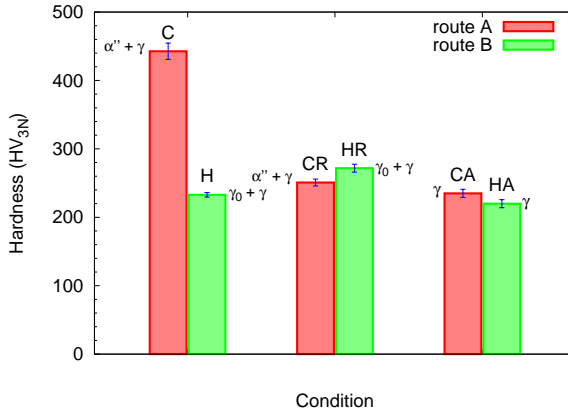
Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese



U – 6 wt.% Nb – 6 wt.% Zr.

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.* **488** (2017) 173 – 180.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

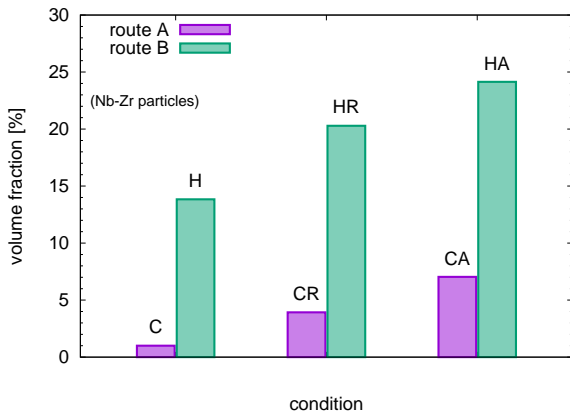
Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Como justificar isso?



U – 6 wt.% Nb – 6 wt.% Zr.

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.* **488** (2017) 173 – 180.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

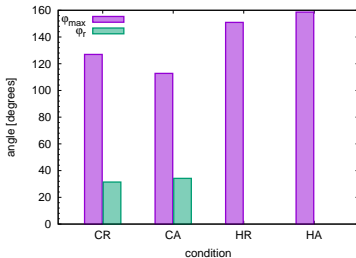
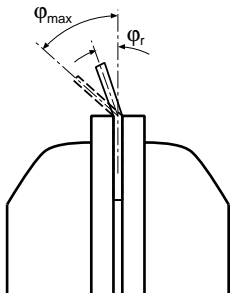
Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese



U – 6 wt.% Nb – 6 wt.% Zr.

Fonte: N. W. S. Morais, D. A. Lopes, C. G. Schön, *J. Nuc. Mater.* **488** (2017) 173 – 180.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e criticidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem de reatores compactos

Desenvolvimento de combustível metálico monolítico

Síntese

Síntese

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Energia não é apenas algo útil, mas também um objetivo a ser perseguido.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Urânio é um presente do universo, dado muito antes da formação do sistema solar. Não usá-lo, portanto, é um “insulto” àquelas pobres estrelas que explodiram por nós.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

O Brasil, com a 5^a maior reserva de minério de Urânio do mundo, tem condições ideais (e necessidade) para a exploração da energia nuclear.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia

Nuclear: o caso
brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

A exploração da energia nuclear está fortemente relacionada à ciência dos materiais.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

A interação de materiais com a radiação induz uma série alterações nos materiais, que levam a fenômenos inusitados (como a recristalização induzida por irradiação e a corrosão-sob-tensão assistida por radiação).

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

A engenharia nuclear é o ambiente ideal para o emprego de materias inovadores.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

A busca de novos combustíveis cria desafios ainda sem solução.

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Ou seja: O trabalho está apenas começando!

Naturalmente, nada disso seria possível sem...

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Naturalmente, nada disso seria possível sem...
Nathanael W. S. Morais - DT - Marinha do Brasil

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Naturalmente, nada disso seria possível sem...
Matheus A. Tunes - MS - Marinha do Brasil

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Naturalmente, nada disso seria possível sem...
Vinícius O. Santos - MS - Marinha do Brasil

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Naturalmente, nada disso seria possível sem...
Eduardo P. Mendes - MS

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Naturalmente, nada disso seria possível sem...
Cynthia M. Noda - IC - Marinha do Brasil

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Naturalmente, nada disso seria possível sem...
Marina Moretão - IC - Marinha do Brasil

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Naturalmente, nada disso seria possível sem...
Camila Maggi - IC - Marinha do Brasil

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Naturalmente, nada disso seria possível sem...
Felipe E. P. Santos - IC e TF - CNPq, FAPESP

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

Naturalmente, nada disso seria possível sem...
Valmir B. Martins - TF

Motivação

Objetivo

Urânio

Fontes de energia

Uma pequena (grande) história do Urânio

Formação do Urânio

Descoberta da radiação

Fissão nuclear e
criticalidade

Situação atual

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Materiais e radiação

Desenvolvimentos

Otimização de blindagem
de reatores compactos

Desenvolvimento de
combustível metálico
monolítico

Síntese

