

# **ANÁLISE DE DESEMPENHO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR**

**Antonio Teixeira e Silva e Claudia Giovedi**

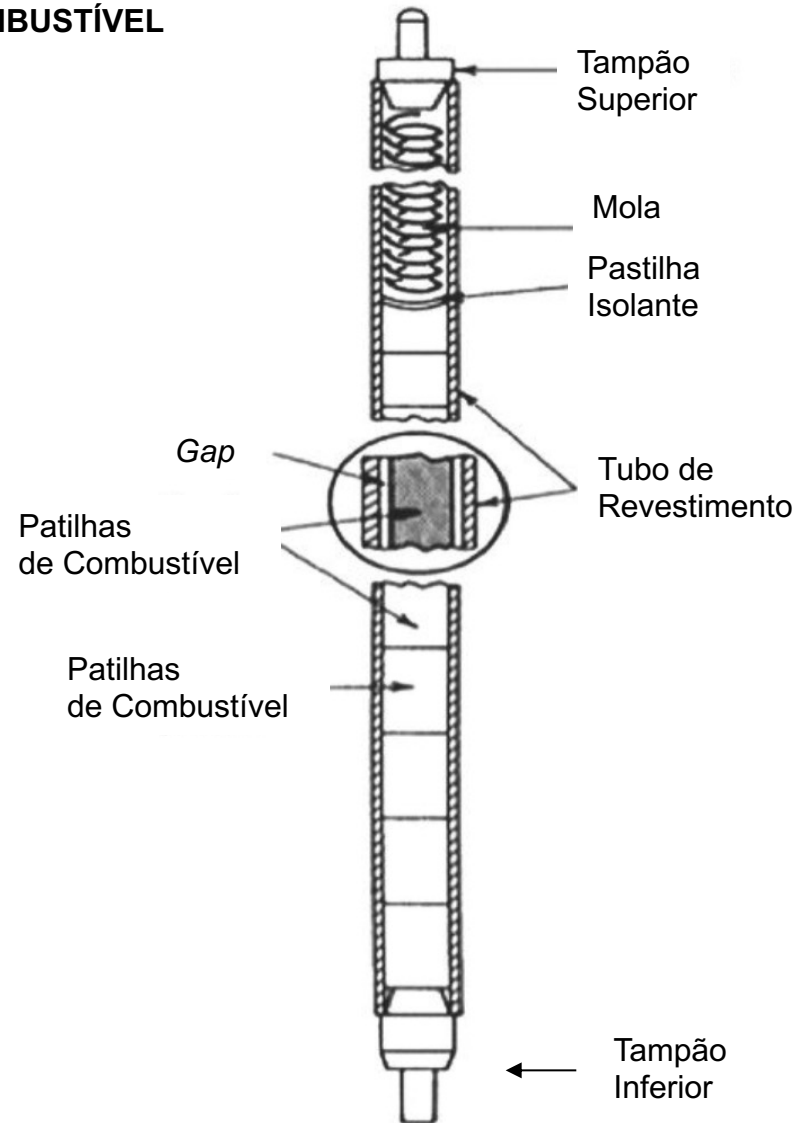
**Novembro 2023**

## **MÓDULO 5**

# **MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL**

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

## VARETA DE COMBUSTÍVEL



## COMPONENTES:

- Tubo de Revestimento
- Tampões de Extremidades (Superior e Inferior)
- Pastilhas Isolantes ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Pastilhas de Combustível ( $\text{UO}_2$ )
- Mola
- Gás de enchimento

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA COMBUSTÍVEL



## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA COMBUSTÍVEL

O objetivo principal do projeto da vareta de combustível é assegurar que uma vareta hipotética opere nas condições mais adversas com um bom desempenho nuclear, sem degradação da segurança, garantindo a não ocorrência sistemática de falhas devido às condições às quais é submetida durante a irradiação.

Entende-se por falha na vareta combustível a perda da função de segurança associada à barreira física proporcionada pelo revestimento.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA COMBUSTÍVEL

Para qualquer modo de operação normal ou evento de condição de operação anormal ou de emergência, a vareta combustível deve ser capaz de:

- Promover uma barreira para separar o combustível e os produtos de fissão do refrigerante
- Prover e manter a geometria do combustível, tanto axial quanto radialmente
- Permitir o fluxo de refrigerante e a transferência de calor dentro dos limites admissíveis
- Ser capaz de se auto suportar
- Resistir à ação de forças de escoamento
- Manter sua geometria, de modo a permitir a inserção das varetas de controle
- Acomodar efeitos químicos, térmicos, mecânicos e de irradiação nos materiais como, por exemplo, corrosão, hidretação, endurecimento por irradiação, densificação do combustível, fluência e relaxação dos materiais

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA COMBUSTÍVEL

### **Critérios de Licenciamento:**

- A pressão interna da vareta de combustível deve ser inferior à pressão do refrigerante
- A temperatura central do combustível deverá ser inferior à temperatura de fusão do material combustível
- A deformação máxima (elástica+plástica) do revestimento deve ser inferior a 1% (zircaloy)

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Descrição Geral da Vareta de Combustível e seus Componentes

- Vareta: componentes e procedimento de montagem
- Combustível: material, geometria
- Revestimento: material, geometria, estado metalúrgico
- Tampões de extremidade: material, geometria, estado metalúrgico, tipo de solda
- Gás de Enchimento: tipo, grau de pureza
- Mola: material, geometria, estado metalúrgico
- Pastilhas Isolantes: material, geometria



## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

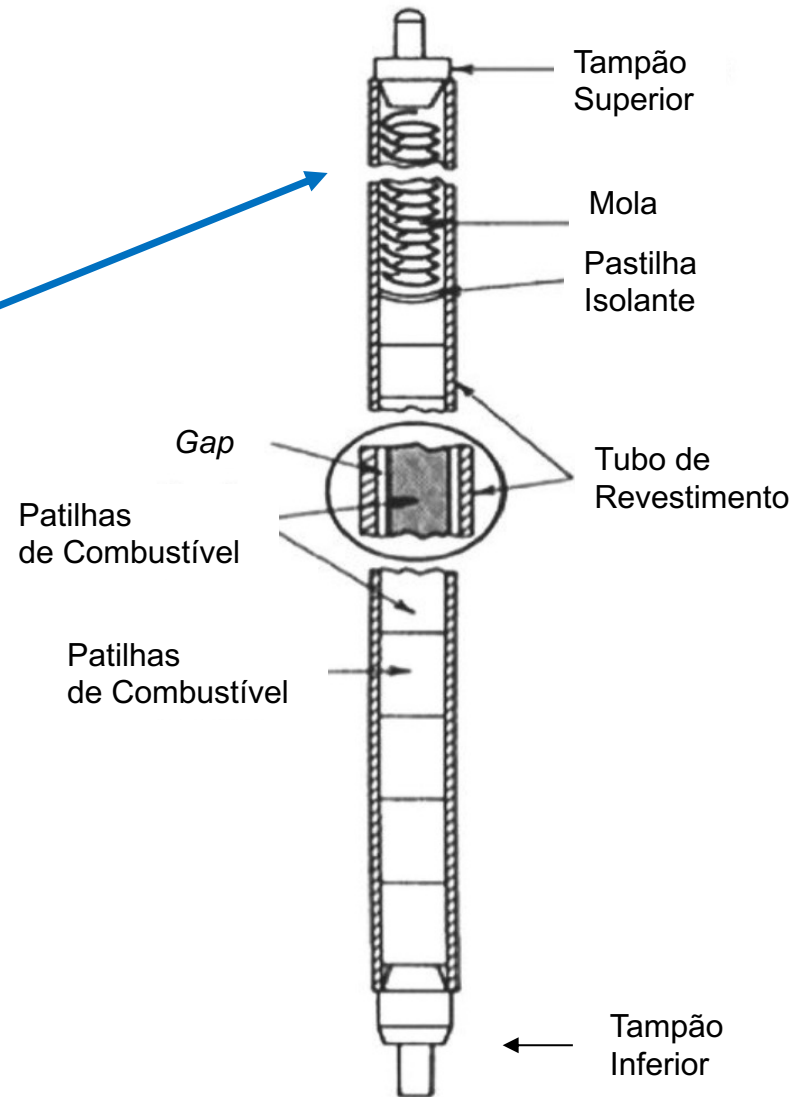
### Dados de Projeto do Reator

- Potência Térmica Nominal do Reator
- Número de Elementos de Combustível no Núcleo
- Número de Varetas de Combustível por Elemento
- Número de Varetas de Combustível no Núcleo
- Comprimento Ativo das Varetas de Combustível
- Densidade Linear de Potência Térmica Média no Combustível
- Perfil Axial do Fator de Potência na Vareta mais Quente do Núcleo (segundo cálculos neutrônicos de estratégia de barras de controle para início, meio e fim de vida)
- Fator de Pico Nuclear Máximo ( $F_Q^{Nmax}$ )

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Dados de Projeto da Vareta de Combustível\*

- Comprimento
- Pressão do Gás de Enchimento
- Comprimento do *Plenum*

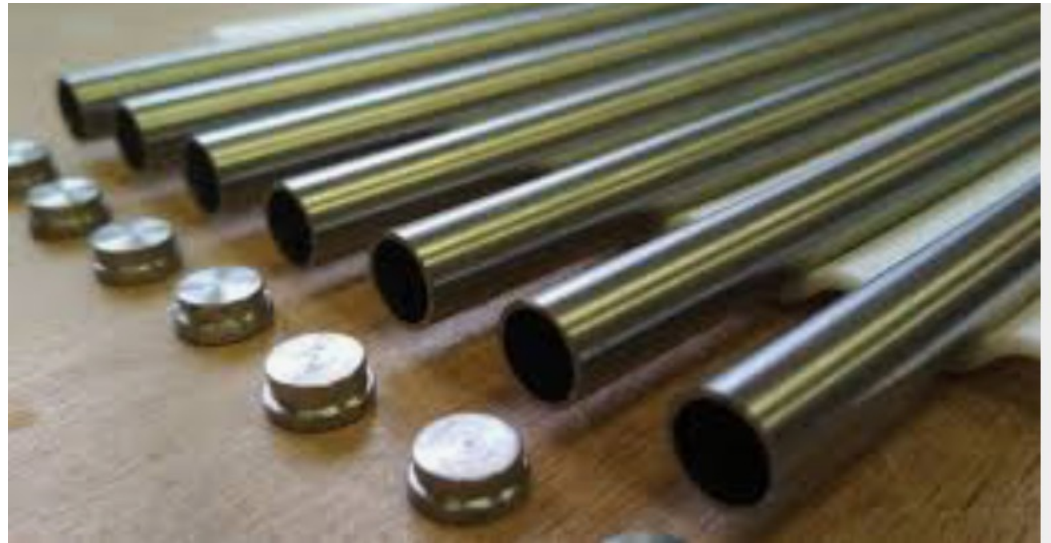


\*com tolerâncias de fabricação

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Dados do Tubo de Revestimento\*

- Comprimento
- Diâmetro externo
- Diâmetro interno

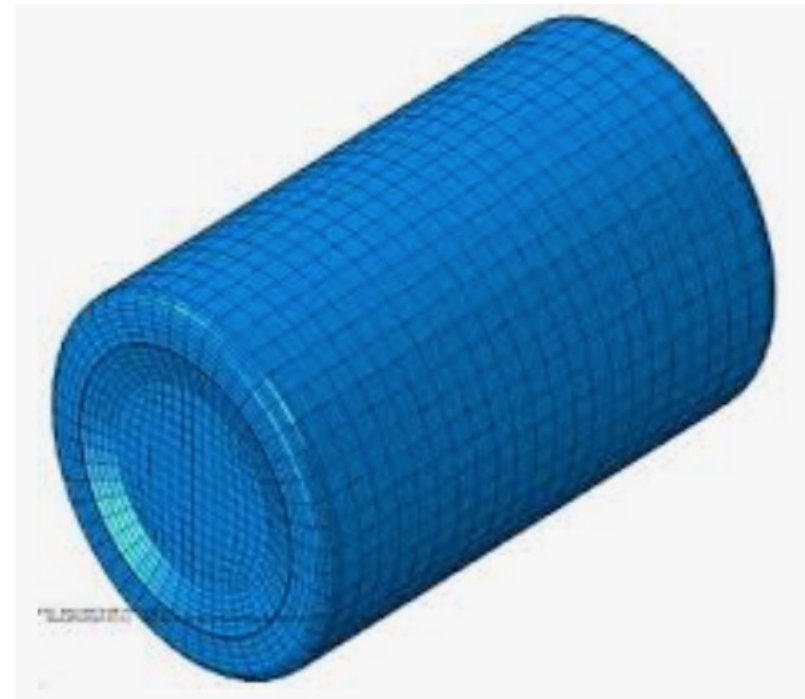


*\*com tolerâncias de fabricação*

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Dados da Pastilha de Combustível\*

- Altura da coluna ativa
- Altura da pastilha
- Diâmetro da pastilha
- Raio do *dish* (concavidade)
- Profundidade do *dish* (concavidade)
- Borda
- Ângulo do chanfro
- Profundidade do chanfro



*\*com tolerâncias de fabricação*

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Dados da Pastilha Isolante\*

- Altura da pastilha
- Diâmetro da pastilha
- Número de pastilhas por vareta
- Ângulo do chanfro (se houver)
- Profundidade do chanfro (se houver)



*\*com tolerâncias de fabricação*

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Dados da Mola\*

- Diâmetro do fio
- Diâmetro interno da mola
- Diâmetro externo da mola
- Número de espiras úteis
- Comprimento livre
- Número de espiras de extremidades niveladas
- Passo



*\*com tolerâncias de fabricação*

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Dados do Refrigerante\*

- Pressão
- Temperatura
- Vazão

*\*com tolerâncias de operação*

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

## Documentos de projeto:

Todas as características da vareta de combustível e de cada um de seus componentes, incluindo os ensaios e testes para qualificação de cada componente são descritos nos desenhos e especificações técnicas de projeto, os quais por sua vez devem atender aos requisitos das normas aplicáveis a materiais nucleares.

Designation: C 776 - 06

## Standard Specification for Sintered Uranium Dioxide Pellets<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 776; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. An uppercase letter (A) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### INTRODUCTION

This specification is intended to provide the nuclear industry with a general specification for uranium dioxide pellets. It recognizes the diversity of manufacturing methods by which uranium dioxide pellets are produced and the many special requirements for chemical and physical characterization which may be imposed by the operating conditions to which the pellets will be subjected in specific reactor systems. Therefore, it is anticipated that the purchaser may supplement this specification with additional requirements for specific applications.

#### 1. Scope

1.1 This specification is for finished sintered uranium dioxide pellets. It applies to uranium dioxide pellets containing uranium in the form of nuclear reactors.

1.2 This specification recognizes the presence of reprocessed uranium in the fuel cycle and consequently defines isotopic limits for uranium dioxide pellets made from commercial grade  $UO_2$ . Such commercial grade  $UO_2$  is defined to mean, regarding fuel design and manufacture, the product is essentially equivalent to that made from unirradiated uranium  $UO_2$ , falling outside these limits cannot necessarily be regarded as equivalent and may not have special provisions at the fuel fabrication plant or in the fuel design.

1.3 This specification does not include (a) provisions for preventing criticality accidents or (b) requirements for health and safety. Observance of this specification does not relieve the user of the obligation to be aware of and conform to all Federal, state, and local regulations pertaining to possessing, shipping, processing, or using source or special nuclear material. Examples of U.S. Government documents are *Code of Federal Regulations* (42 CFR 102, 103, 104, Part 50, Title 10, Part 71, and Title 49, Part 173).

1.4 The following precautionary caveat pertains only to the technical requirements of portion, Section 4, of this specification: This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

<sup>1</sup>This specification was under the jurisdiction of ASTM Committee C26 on Nuclear Fuel Cycle and the direct responsibility of Subcommittee C77.02 on Fuel and Irradiation Materials.

Current edition approved April 1, 2006. Published September 2006. Originally approved in 1976. Last previous edition approved in 2000 as C 776 - 00.

#### 2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

C 666 Test Methods for Chemical, Mass Spectrometric, and Spectrochemical Analysis of Nuclear Grade Uranium Dioxide Powders and Pellets

C 753 Specification for Nuclear Grade, Sinterable Uranium Dioxide Powder

C 859 Terminology Relating to Nuclear Materials<sup>3</sup>

C 996 Specification for Uranium Hexafluoride Enriched Less Than 5 % <sup>235</sup>U

F 1233 Practice for Determining Equivalent Boron Content of Nuclear Materials

F 105 Practice for Probability Sampling of Materials

2.2 ANSI Standard:<sup>4</sup>

ANSI/ASME NQA-1 Quality Assurance Requirements for Nuclear Facility Applications

2.3 U.S. Government Documents:

Code of Federal Regulations (Latest Edition), Title 10, Part 50, Energy (10 CFR 50) Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities

Code of Federal Regulations, Title 10, Part 71, Packaging and Transportation of Radioactive Material<sup>5</sup>

Code of Federal Regulations, Title 49, Part 173, General Requirements for Shipments and Packaging<sup>6</sup>

Regulatory Guide NG-1806 (1-126) An Acceptable Model and Related Statistical Methods for the Analysis of Fuel

<sup>2</sup>For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

<sup>3</sup>Withdrawn.

<sup>4</sup>Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 18th Floor, New York, NY 10018.

<sup>5</sup>Available from Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20540.

Copyright © ASTM International, 100 Bar Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2098. All Rights Reserved.

# ASTM INTERNATIONAL

Designation: C 785 – 93<sup>1</sup>

Standard Specification for  
Nuclear-Grade Aluminum Oxide Pellets<sup>1</sup>

This standard is issued under the label designation C 785; the number immediately following the designation indicates the year of original approval or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript letter (a) indicates an additional change since the last revision or reapproval.

<sup>1</sup> Non-Paragraphs 5.1.2 and 12.1 were corrected editorially in March 1994.

## 1. Scope

1.1 This specification applies to pellets of aluminum oxide which may be ultimately used in a reactor core design, for example, as fuel or spacers within fuel, burnable poison, or control rods. In order to distinguish between the subject pellets and "burnable poison" pellets, it is established that the subject pellets are not intended to be used as neutron-absorbing material.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

## 2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:  
C 559 Test Method for Bulk Density by Physical Measurements of Manufactured Carbon and Graphite Articles<sup>2</sup>  
C 809 Methods for Chemical, Mass Spectrometric, and Spectrochemical Analysis of Nuclear-Grade Aluminum Oxide and Aluminum Oxide-Boron Carbide Composite Pellets<sup>3</sup>  
C 850 Terminology Relating to Nuclear Materials<sup>4</sup>  
F 105 Practice for Probability Sampling of Materials<sup>5</sup>  
2.2 ANSI Standard:  
ANSI/ASME NQA-1 Quality Assurance Program Requirements for Nuclear Facilities<sup>6</sup>  
2.3 U.S. Government Documents:  
Code of Federal Regulations, Title 10, Part 50, Energy, (10CFR50) Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities<sup>7</sup>

## 3. Terminology

3.1 **Definitions**—Terms shall be defined in accordance with Terminology C 859 except for the following:  
3.2 **Definitions of Terms Specific to This Standard:**  
3.2.1 **bayer**—organization issuing the purchase order.  
3.2.2 **pellet**—fabricated geometric shape of aluminum oxide having a chemical composition as described in Section 4.  
3.2.3 **pellet lot**—that quantity of pellets produced from one aluminum oxide powder lot using one set of process parameters whose limits have been agreed upon between the seller and the buyer.  
3.2.4 **powder lot**—a specified quantity of aluminum oxide powder made up of powders from one or more sources blended together such that samples taken in accordance with 7.1 can be considered as representative of the entire specified quantity.  
3.2.5 **seller**—aluminum oxide pellet supplier.

## 4. Chemical Composition

4.1 Use analytical chemical methods in accordance with Methods C 809 or demonstrated alternate methods agreed upon between the buyer and the seller.  
4.2 The finished aluminum oxide pellets shall conform to the following chemical analysis:

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| $B_2O_3$ + boric acid    | 0.01 weight % max        |
| Fe                       | 0.2 weight % max         |
| Fe + Cr + Ni             | 0.6 weight % max         |
| Al                       | 1.0 weight % max         |
| Si                       | 0.2 weight % max         |
| Ca                       | 0.05 weight % max        |
| Mg                       | 0.05 weight % max        |
| Na                       | 200 $\mu$ g/g pellet max |
| F                        | 50 $\mu$ g/g pellet max  |
| 100 $\mu$ g/g pellet max |                          |
| F + Cr + Ni + Br         |                          |

Any element impurity not listed in 4.2 shall not exceed 100 weight % as determined by emission spectroscopy. The sum of all impurities shall not exceed 4.0 weight %.

4.2.1 The total equivalent boron content (IEBC) of the finished aluminum oxide pellets shall not exceed 400 mg/g or a pellet weight basis. The total IEBC is the sum of the individual IEBC values. Table 1 is a list of elements to be considered in calculating total IEBC. The IEBC of each impurity element shall be calculated individually using the following equation:

<sup>1</sup> This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C-28 on Nuclear Fuel Cycle and is the joint responsibility of Subcommittee C-28-01 on Nuclear Absorber Materials Specifications.

<sup>2</sup> Current edition approved Nov. 15, 1993. Published February 1994. Originally published as C 785-78. Last previous edition C 785-77.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.01.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 12.01.

<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

<sup>6</sup> Available from American Nuclear Standards Institute, 11 W. 42nd St., 130 Floor, New York, NY 10018.

<sup>7</sup> Available from Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20540.



## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais

- Combustível: calor específico, difusividade térmica, condutividade térmica, expansão térmica e coeficiente de expansão linear, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, dureza, fluência por irradiação, densificação por irradiação, inchamento por irradiação, resistência à compressão (em função da temperatura)
- Revestimento: calor específico, condutividade térmica, emissividade térmica, coeficiente de expansão térmica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, dureza, fluência por irradiação, inchamento por irradiação, limite de escoamento, limite de resistência (em função da temperatura)
- Mola: módulo de elasticidade, características de relaxação da mola devido a altas temperaturas e irradiação
- Pastilhas Isolantes: calor específico, difusividade térmica, condutividade térmica, expansão térmica e coeficiente de expansão linear, inchamento por irradiação, resistência à compressão (em função da temperatura)

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Limites de tensão no revestimento (código ASME)

- Limites de Tensão para Condições de Operação Normal e Anormal
- Limites de Tensão para Condição de Emergência

### Carregamentos de projeto

- Carregamentos atuantes no revestimento fora da faixa de solda: pressão diferencial, gradientes de temperatura, força axial de fixação da vareta na grade, expansão térmica diferencial, força de pré-compressão da mola de fixação, vibrações induzidas pelo escoamento do fluido refrigerante, forças induzidas pelo escoamento do refrigerante
- Carregamentos atuantes no revestimento na faixa de solda: pressão diferencial no revestimento, expansão térmica diferencial do revestimento e tampão, tensão exercida pela mola de fixação

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Transientes de Projeto

Basicamente, quatro categorias de transientes são especificados para o projeto de reatores:

- Transientes Normais: transientes com alta incidência, previstos durante a operação normal do reator, cuja função é permitir manobras de potência
- Transientes Anormais: transientes previstos com incidência de baixa a moderada, não desejáveis durante a operação normal do reator, que podem ocorrer devido a falha humana ou de sistemas, mas que não devem acarretar consequências prejudiciais à operação ou a integridade dos componentes do reator
- Transientes de Emergência: transientes causados por falhas de sistemas, que exigem parada do reator, mas que não devem causar danos aos demais componentes do reator
- Transientes de Falha: acidentes postulados, que acarretam sérios danos ao reator. Na ocorrência destes acidentes deve-se garantir a retirada do calor residual do núcleo e a estanqueidade da contenção

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

O projeto de uma vareta de combustível consiste de uma sequência de cálculos baseados em hipóteses que resultam do regime de operação em questão, caracterizando as situações mais extremas ou mais adversas. O desenvolvimento do projeto advém da interação com outras áreas, principalmente a termohidráulica, a física de reatores e o projeto estrutural do elemento combustível. É por meio da integração entre essas áreas que o projeto da vareta de combustível pode ser consolidado.

Os cálculos de projeto levam em conta as informações de outras áreas de projeto, junto com as propriedades de materiais e geométricas da vareta de combustível, assim como, as hipóteses assumidas para o regime de operação e, determinam a sua resposta para os carregamentos aos quais ela estará submetida durante seu tempo de vida.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

Os cálculos para a análise do desempenho da vareta projetada são efetuados, basicamente, utilizando ferramentas computacionais especificamente desenvolvidas para esse fim. A partir de informações referentes às características de fabricação da vareta combustível e do seu histórico de operação (evolução temporal da potência de operação da vareta e das condições termohidráulicas do refrigerante), o programa fornece estimativas das temperaturas, da pressão interna e das tensões e deformações observadas no combustível e revestimento ao longo de toda a vareta. O programa também estima a fragilização do revestimento por oxidação e hidretação durante a irradiação e prediz a probabilidade da ocorrência de falha na vareta de combustível.

Ferramentas computacionais tradicionais podem ser utilizadas para complementar as análises necessárias. Um bom exemplo é a utilização do código ANSYS para obter o mapa de tensões e deformações desenvolvidas para diferentes geometrias de pastilhas de combustível sujeitas a um gradiente térmico.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

Os cálculos para o projeto da vareta combustível são realizados considerando-se uma combinação não favorável de fatores que levam às situações mais extremas em termos da potência local. Também há verificações não somente se a vareta de combustível obedece aos critérios e limites de projeto, como também, qual o melhor dimensionamento e características de material para cada um de seus componentes.

Um exemplo de sequência de análises a serem feitas para a avaliação do projeto de uma vareta de combustível é:

- 1 - Dimensionamento da pastilha combustível de  $\text{UO}_2$
- 2 - Dimensionamento do *plenum* da vareta combustível
- 3 - Definição da pressão interna inicial
- 4 - Dimensionamento da mola de sustentação da coluna de pastilhas (mola do *plenum*)
- 5 - Dimensionamento das pastilhas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$

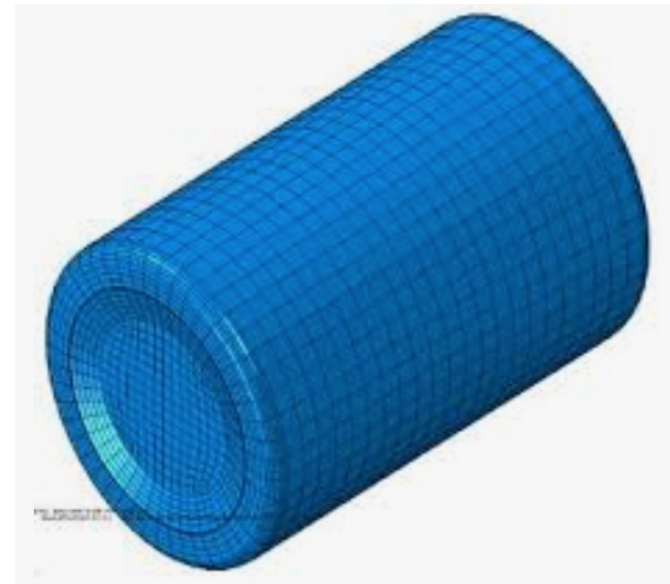
## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

*Dimensionamento da pastilha combustível de  $UO_2$  - Geometria*

Parâmetros a serem definidos:

- Altura mínima do *dish* (concavidade)
- Raio do *dish* (concavidade)
- Ordem de grandeza da borda e do chanfro
- Relação entre altura e diâmetro da pastilha



## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento da pastilha combustível de $UO_2$ - Geometria*

As ondulações no revestimento (efeito “bamboo”) podem ser reduzidas com o uso de pastilhas com menores razão  $h/d$ , bordas mais largas e chanfro de  $45^\circ$ . Constatou-se também que tanto as deformações no diâmetro da pastilha quanto na altura podem ser significativamente reduzidas pela presença de concavidades em ambas as extremidades da pastilha.

Para a determinação das dimensões adequadas do raio e da altura do *dish* (concavidade), da borda e do chanfro das pastilhas combustível, deve-se utilizar um programa de análise de desempenho e um programa para análise mecânica. O programa de análise mecânica permite obter as tensões e deformações para diferentes geometrias de pastilhas sujeitas a um gradiente térmico e o programa de análise de desempenho possibilita a determinação da distribuição espacial da temperatura na pastilha combustível.



## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento da pastilha combustível de $UO_2$ - Geometria*

- Razões  $h/d$  da ordem de 1,25 são observadas na maioria dos reatores, isso produz menores ondulações circunferenciais e menores deformações no revestimento
- *Dish* (concavidade) duplo e chanfro, reduz deformações axiais e radiais
- A presença de uma borda maior, associada a um chanfro de  $45^\circ$  reduz as deformações circunferenciais (efeito “bamboo”) no revestimento da vareta, além de facilitar o processo de fabricação. A presença da borda maior e chanfro provoca deformações axiais e radiais menores dos que observadas na pastilha com faces planas ou apenas com *dish* (concavidade)
- O ângulo do chanfro, da ordem de  $45^\circ$ , contribui para a redução da ocorrência do efeito “bamboo” no revestimento das varetas de combustível e também previne a formação de lascas na pastilha

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento da pastilha combustível de $UO_2$ - Densidade*

A densidade da pastilha é um dado importante de projeto, pois influencia muitas de suas propriedades, tais como: condutividade térmica, módulo de elasticidade, fluência, tensão de ruptura, reestruturação, densificação e liberação de gases.

Valores típicos estudados de densidade são da ordem de 91 a 95%.

A análise realizada utilizando-se códigos de desempenho permite avaliar para diferentes densidades de pastilha:

- Temperatura central na pastilha
- Pressão interna inicial na vareta
- Temperatura na superfície da pastilha
- Diâmetros da pastilha e interno do revestimento

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento da pastilha combustível de $\text{UO}_2$ - Densidade*

Pastilhas combustível com densidades iniciais menores atingem temperaturas centrais mais elevadas.

As maiores liberações de gases de fissão são observadas em pastilhas combustível com menores densidades devido às maiores temperaturas atingidas e à maior quantidade de poros abertos presentes na pastilha, acarretando maiores elevações na pressão interna da vareta de combustível e maiores reduções ou degradação na condutividade térmica na região da folga pastilha-revestimento.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento da pastilha combustível de $\text{UO}_2$ - Temperatura de Sinterização*

A temperatura de sinterização é um dado técnico importante e a maioria dos modelos empíricos para a densificação a considera no cálculo da variação de volume da pastilha durante a irradiação (teste de ressinterização). A densificação é dependente da queima e das características do combustível, as quais se correlacionam por meio da temperatura de sinterização.

Observa-se que pastilhas sinterizadas em temperaturas de  $1700^\circ\text{C}$  apresentam menor densificação e, conseqüentemente, devido à menor folga que se estabelece entre pastilha e revestimento, também apresentam as menores temperaturas centrais e maiores pressões internas na vareta.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento do plenum da vareta combustível*

No decorrer da queima, a liberação de gases de fissão da pastilha combustível deprecia a condutividade térmica na região da folga pastilha-revestimento, elevando a temperatura do combustível. Em varetas com comprimento de *plenum* menores, esta depreciação é maior. Apesar de que com maiores temperaturas, a expansão térmica da pastilha e a componente devido ao inchamento do combustível aumentam, tornando a espessura da folga pastilha-revestimento menor, os efeitos da depreciação da condutividade térmica da folga predominam na distribuição de temperatura do combustível.

Para comprimentos de *plenum* maiores, a depreciação da condutividade térmica da folga pastilha-revestimento é menor, devido ao maior espaço disponível no *plenum* para acomodação dos gases liberados pelo combustível. Neste caso, observam-se menores temperaturas no combustível e, conseqüentemente, a liberação de gases também é menor.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento do plenum da vareta combustível*

A pressão interna da vareta é tanto maior quanto menor o *comprimento* do *plenum* devido ao menor volume para a acomodação dos gases de fissão. Como o volume para a acomodação dos gases é menor para menores comprimentos de *plenum* e nestes casos a liberação de gases é maior, devido às maiores temperaturas no combustível, a pressão interna da vareta torna-se mais elevada, reduzindo as tensões axiais e circunferenciais no final da irradiação. Devido às maiores pressões internas atingidas para menores comprimentos de *plenum*, as tensões de membrana primária serão menores em função da menor diferença entre as pressões interna e externa.

Em suma, o comprimento do *plenum* deve ser definido buscando-se temperaturas e pressões mais baixas na vareta, considerando-se o comprimento da vareta de combustível e as dimensões do núcleo.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Definição da pressão interna inicial*

Maiores temperaturas são atingidas no combustível quando se aumenta a pressão interna inicial da vareta de combustível. A maior quantidade de gases piora a transferência de calor entre pastilha e revestimento, e conseqüentemente, a temperatura do combustível aumenta.

Maiores temperaturas na pastilha levam a maiores expansões térmicas e a um maior inchamento do combustível. Em decorrência disso, ocorre maior liberação de produtos de fissão, levando à diminuição da condutância na folga entre a pastilha e o revestimento e a pressões mais elevadas.

As tensões de membrana primárias no revestimento diminuem à medida que a pressão interna da vareta se eleva devido à menor diferença entre as pressões interna e externa.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento da mola de sustentação da coluna de pastilhas (mola do plenum)*

A mola de fixação da coluna de pastilhas, localizada no *plenum* da vareta de combustível, deve exercer uma pré-tensão nesta coluna para efeito de transporte e movimentação da vareta de combustível, não permitindo o deslocamento das pastilhas e garantindo a integridade da coluna.

Critérios estabelecidos para a mola de fixação da coluna de pastilhas, impõe que esta deve exercer uma força superior a 2 ou 3 vezes o peso da coluna de pastilhas e que seu diâmetro seja próximo ao diâmetro interno do revestimento. A razão desta força está associada ao fato de que a mola deve exercer uma força maior que o peso da coluna para efeitos de movimentação e transporte da vareta.

Em reatores PWR convencionais, após o assentamento do elemento de combustível no núcleo, nenhuma movimentação da vareta é prevista durante sua operação. Os efeitos da contração e expansão da coluna de pastilhas durante a irradiação, bem como a dilatação térmica do revestimento na direção axial, afetam a força exercida pela mola sobre a coluna de pastilhas. Outro aspecto importante da mola do *plenum* é a sua relaxação ao longo do tempo devido às altas temperaturas e à irradiação.



## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento da mola de sustentação da coluna de pastilhas (mola do plenum)*

Durante o período de irradiação, o comprimento do *plenum* sofre variações que irão se refletir na deformação da mola.

No início da irradiação, a expansão axial da coluna de pastilhas é menor que a do revestimento, assim a mola distende, diminuindo a sua força de atuação inicial. Com a densificação das pastilhas, a altura da coluna diminui e a força que a mola exerce sobre a coluna de pastilhas diminui ainda mais. No decorrer da irradiação, a coluna cresce axialmente devido ao inchamento do combustível, conseqüentemente, o comprimento do *plenum* diminui e a força da mola aumenta.

A força máxima especificada para a mola não deve causar danos à coluna de pastilhas. A aplicação desta força, acrescida do peso da coluna de pastilhas de  $\text{UO}_2$ , sobre a última pastilha da coluna deve ser simulada e não deve se notar alterações significativas nas expansões e tensões internas nas pastilhas devido aos gradientes térmicos. As tensões térmicas desenvolvidas, em geral, são muito maiores do que as tensões decorrentes da força da mola mais o peso da coluna, as quais, por si só, não devem levar à fragmentação das pastilhas.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento das pastilhas de $Al_2O_3$*

As pastilhas de alumina ( $Al_2O_3$ ) devem satisfazer às seguintes condições:

- Minimizar a taxa de fluxo de calor entre a coluna de pastilhas de  $UO_2$  e a mola do *plenum* e entre a coluna e o tampão inferior da vareta
- Não manter contato rígido com o revestimento
- Sustentar o peso da coluna de pastilhas e a força aplicada pela mola do *plenum* sem se fragmentarem

O número de pastilhas de alumina por vareta de combustível deve ser definido de acordo com as características do projeto. Pelo menos uma pastilha deve ser posicionada entre a mola do *plenum* e a coluna de pastilhas de  $UO_2$  e outra entre esta coluna e o tampão inferior, permitindo assim, uma montagem adequada da vareta de combustível.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Dimensionamento das pastilhas de $Al_2O_3$*

Para verificar que não ocorra contato rígido entre as pastilhas de alumina e o revestimento, devem ser considerados os seguintes fenômenos: expansão térmica da alumina e deformação por fluência do revestimento; e expansão volumétrica da alumina causada pela irradiação com nêutrons.

Além disso, a pastilha de alumina deverá suportar o peso da coluna de pastilhas e a força exercida pela mola do *plenum* sem se fragmentar.

## MEMORIAL DE CÁLCULO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL

### Cálculos e Análises

#### *Verificação de critérios e limites de projeto*

- A pressão interna da vareta de combustível deve ser inferior à pressão do refrigerante
- A temperatura central do combustível deverá ser inferior à temperatura de fusão do material combustível
- A deformação máxima (elástica+plástica) do revestimento deve ser inferior a 1% (zircaloy)