

**DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO DE PASTILHAS  $UO_2$  DE PWRs**

**Antonio Teixeira e Silva**

Divisão de Engenharia do Núcleo (RT-N)  
Departamento de Reatores (RT)  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)  
Comissão Nacional de Energia Nuclear- SP (CNEEN-SP)

**SUMÁRIO**

O código estrutural em elementos finitos, SAP-IV, é utilizado para calcular as deformações desenvolvidas sob um gradiente térmico em pastilhas  $UO_2$  de PWRs. O procedimento de cálculo aplicado permite analisar a influência de diferentes geometrias de pastilha na deformação imposta ao revestimento da vareta combustível e serve de base para o dimensionamento geométrico da pastilha. Pastilhas com faces planas, com concavidades em ambas as faces, bordas e chanfros de  $45^\circ$  são analisadas. Os resultados da análise são comparados com dados experimentais.

**ABSTRACT**

The finite element structural program SAP-IV is used to calculate  $UO_2$  pellet strains developed under thermal gradients in pressurized water reactors. The applied procedure allows to analyse the influence of various aspects of pellet geometry on cladding strains and can be utilized for the dimensioning of  $UO_2$  pellets. Pellets purchased with flat ends, with dishes pressed into both ends, shoulders, and a 45-deg edge chamfer are analysed. The analyse results are compared with experimental data.

## I. INTRODUÇÃO

A aplicação de rampas de potência em reatores de água leve pressurizada (PWRs) induz a formação de um alto gradiente térmico na pastilha combustível de dióxido de urânio ( $UO_2$ ), levando à sua deformação e à formação de rachaduras. O efeito da expansão térmica, associado a relocação de fragmentos de pastilha, pode levar a interação pastilha-revestimento (PCI), ocasionando uma grande deformação no revestimento e, conseqüentemente, falha na vareta combustível. A geometria de fabricação da pastilha influencia na deformação imposta ao revestimento, principalmente, nas extremidades da pastilha. Esta influência é determinada experimentalmente em testes com rampas de potência /1/, /2/. Nestes testes é analisada para uma determinada rampa a deformação imposta ao revestimento pela variação de parâmetros dimensionais da pastilha tais como: razão comprimento-diâmetro, concavidades, bordas e chanfros (Fig. 1). Os resultados dos testes demonstram que modificações nestes parâmetros influem na deformação do revestimento. Eles são importantes, principalmente, durante a rampa de partida do reator, quando a pastilha não está ainda fragmentada em pequenos pedaços.

A constatação de que uma especificação correta de parâmetros como concavidades, bordas e chanfros na pastilha atuam para um desempenho mais satisfatório do combustível, levou a que fosse desenvolvido neste trabalho um procedimento de cálculo para dimensionamento destes parâmetros e que serve de base para o dimensionamento geométrico da pastilha  $UO_2$  de PWRs. O procedimento consiste em calcular com um código estrutural em elementos finitos, SAP-IV /3/, as deformações desenvolvidas na pastilha combustível quando sujeita a um gradiente térmico máximo. A análise da influência destes resultados na deformação do revestimento permite estimar quantitativamente o melhor dimensionamento dos parâmetros geométricos em questão. Três configurações de pastilhas são analisadas:

- 1) pastilha com faces planas;
- 2) pastilha com concavidades nas faces;
- 3) pastilha com concavidades, bordas e chanfros.

## II. TESTES EXPERIMENTAIS PARA VERIFICAÇÃO DOS ASPECTOS DIMENSIONAIS DAS PASTILHAS $UO_2$ DE PWRs

Diferentes testes experimentais tem sido desenvolvidos para verificar a influência dos aspectos dimensionais da pastilha combustível nas deformações do revestimento. Carter /1/ apresenta diferentes testes com rampas de potência (59.7 KW/m) para várias geometrias de pastilhas, com o objetivo de analisar a deformação imposta aos tubos de zircaloy. Nos testes, diferentes geometria são verificadas, alterando-se variáveis geométricas, tais como: razão entre comprimento (l) e diâmetro (d), volume da concavidade, largura da borda e chanfro da pastilha. A gama de variação destes valores cobrem a faixa de l/d de 0.2 a 1.5, bordas de 0.4 a 3.0 mm, volume da dupla concavidade de 2 a 6% do volume da pastilha e chanfro de 45°.

A Tabela 1 sumariza as variações na geometria da pastilha que reduzem ou aumentam as deformações no revestimento. A Figura 2 apresenta o traçado esquemático do diâmetro da vareta antes e após a irradiação. A altura das ondulações circunferenciais ("ridge height") nas interfaces das pastilhas são obti-

das de h na Figura 2 e as deformações diametraais do revestimento à posição de contacto e a meia altura das pastilhas são calculadas por  $100 (D3-D1)/D1$  e  $100 (D2-D1)/D1$ .

Da Tabela 1 nota-se que a altura das ondulações circunferenciais do revestimento podem ser reduzidas pelo uso de pastilhas com menores razões  $l/d$ , bordas mais largas e chanfro de  $45^\circ$ . Deformações nas interfaces das pastilhas podem também ser reduzidas por estas mudanças na geometria. Entretanto, deformações à meia-altura da pastilha podem ou não ser afetadas. Deformações axiais na vareta são reduzidas pela diminuição da razão  $l/d$  e majoradas com o aumento da largura da borda. Tanto as deformações diametraais como as deformações axiais são reduzidas por uma concavidade dupla.

Rolstad e Krudsen /2/ variaram sistematicamente os parâmetros dimensionais de pastilhas de 24 varetas combustíveis, para estudar os efeitos na formação de ondulações circunferenciais no revestimento durante a partida de potência do reator e em operação à baixa queima. Pastilhas com as seguintes dimensões foram testadas:

- comprimento: 7, 14, 20 e 30mm
- interface das pastilhas: planas, com concavidades e com concavidades e chanfros.

As conclusões destes testes foram:

- 1) pastilhas com concavidades produzem maiores alturas de ondulações circunferenciais que pastilhas com interfaces planas;
- 2) pastilhas com concavidades e chanfro dão aproximadamente as mesmas alturas de ondulações circunferenciais que pastilhas com interfaces planas;
- 3) pastilha com comprimento de 14, 20 e 30mm apresentam as mesmas alturas de ondulações circunferenciais, enquanto pastilhas de 7mm de comprimento apresentam valores 50% menores.

### III. SIMULAÇÕES COM O SAP-IV

As simulações desenvolvidas com o SAP-IV têm o objetivo de verificar através de um procedimento de cálculo, os resultados experimentais obtidos acima. Três configurações de pastilha foram analisadas:

- 1) configuração 1: pastilha com faces planas;
- 2) configuração 2: pastilha com concavidades;
- 3) configuração 3: pastilha com concavidades, bordas e chanfros de  $45^\circ$ .

Os seguintes dados de entrada são necessários para a simulação:

- 1) distribuição de temperatura na pastilha;
- 2) coeficiente de expansão térmica;
- 3) módulo de elasticidade;
- 4) coeficiente de Poisson.

A distribuição de temperatura na pastilha é determinada por um código de desempenho do combustível. O interesse recai no gradiente térmico máximo, obtido pela aplicação da rampa de potência máxima, que fornece as maiores deformações na pastilha. No caso, a vareta combustível a ser projetada pode ser anali

sada com um código de desempenho do combustível, como o FRAPCON-1 /4/, para o histórico de potência mais desfavorável e na posição do pico de potência. A análise de um histórico no pico de potência e não de uma única rampa, leva em consideração os diversos fenômenos que atuam no combustível, permitindo obter a distribuição máxima de temperatura que ocorre durante a irradiação. Para desenvolvimento do procedimento de cálculo neste trabalho, foi utilizada a distribuição de temperatura na pastilha apresentada na tabela 2. Esta distribuição representa as temperaturas para 21 nós radiais a partir do centro da pastilha. Desta distribuição foram calculadas as outras variáveis de entrada do programa SAP-IV: o coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) e o módulo de elasticidade (E) da pastilha (Tab. 2). Todas as fórmulas para estas variáveis dependentes da temperatura são obtidas do MATPRO-11 /5/. Da mesma referência é obtido o coeficiente de Poisson  $\mu=0.316$ .

A primeira simulação com o SAP-IV foi desenvolvida para a configuração 1. Devido a simetria da pastilha em torno do seu eixo axial, o estudo foi feito com elementos axissimétricos que melhor representam o cálculo das deformações na pastilha. Foi utilizado por questão de simetria apenas um quadrante do plano axial da pastilha. Foi escolhida uma relação  $l/d=1.24$ , típica de reatores PWRs. A malha de elementos, as restrições de deslocamento e a numeração dos nós e dos elementos adotadas são apresentadas na Figura 3. A malha é constituída de um arranjo de  $21 \times 26$  nós e 500 elementos.

Da listagem de saída do código SAP-IV foi levantado o perfil de deformação da pastilha. Este perfil é apresentado na Figura 4 e as deformações obtidas nas direções cartesianas y e z são apresentados para alguns nós nas faces de contato e ao longo da pastilha na Tabela 3. Nota-se da Figura 4 a forma convexa nas interfaces das pastilhas. Esta forma mostra uma expansão menor do que aconteceria no reator. Na realidade, as tensões geradas nas partes mais externas da pastilha são superiores à tensão de ruptura do material (100MPa)(Fig.5). O cálculo executado pelo programa obedece um comportamento linear do material que não é real. Quando se ultrapassa a tensão de ruptura, formam-se rachaduras e estas liberam as tensões fazendo com que a expansão do material seja maior do que a apresentada. A Figura 5 apresenta a distribuição das tensões térmicas tangenciais na pastilha e a tensão média de ruptura, acima da qual ocorreriam as rachaduras.

Mais duas simulações foram desenvolvidas para as configurações 2 e 3. Os dados de entrada para estas simulações são os mesmos da simulação anterior, com modificações apenas na malha de elementos. Na configuração 2, a concavidade é simulada retirando-se da malha de face plana 15 elementos, como mostrado na Figura 6. Essa configuração fornece uma concavidade retangular de  $0.75R$  de comprimento e  $0.04L$  de altura. O chanfro na configuração 3 foi simulado retirando-se três elementos da malha da configuração 2, fornecendo uma borda de  $0.15R$  (Fig. 7). Na Tabela 3 estão representados para as três configurações de pastilha, as deformações nos eixos y e z obtidos das simulações.

#### IV. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS COM DADOS EXPERIMENTAIS

Uma comparação entre os resultados de cálculo apresentados na Tabela 3 e os dados experimentais do capítulo II podem ser resumidos nos seguintes itens:

- 1) a configuração 1 apresenta o maior alongamento axial da coluna de pastilhas (nó 526, eixo z). As configurações 2 e 3 reduzem o alongamento axial (nó 505, eixo z). Os dados de Carsten mostram que um aumento na largura da borda acarreta maiores deformações axiais. Entretanto, a borda de  $0.04L$  usada na configuração 3 não contribui para um aumento do alongamento axial (nó 525), quando comparada com a configuração 2 (nó 526).
- 2) a configuração 2 apresenta o maior alongamento no eixo y (nó 531), levando a maiores ondulações circunferenciais no revestimento e maiores deformações nas interfaces das pastilha. O alongamento no eixo y é mínimo na configuração 3 (nó 504). Estes resultados reproduzem os de Rolstad e Knudsen e os de Carstens, que mostram que as ondulações circunferenciais e deformações nas interfaces das pastilhas podem ser reduzidas pela utilização de uma concavidade, borda e chanfro de  $45^\circ$ .
- 3) a configuração 3 apresenta os maiores alongamentos no eixo y entre os nós 252 e 504, quando comparada com as outras configurações. Isto concorda com os resultados de Carsten que prevê que a utilização de um chanfro leva a maiores deformações ao longo da pastilha.

Os resultados acima mostram que o procedimento de cálculo aplicado reproduz de modo satisfatório os testes experimentais e pode ser utilizado quando da especificação geométrica da pastilha de  $UO_2$ . A configuração com uma dupla concavidade, borda e chanfro de  $45^\circ$  apresenta-se como a mais recomendável para a pastilha. A dupla concavidade diminui o alongamento axial da coluna de pastilhas e associada a uma borda e a um chanfro de  $45^\circ$  permite a redução das ondulações circunferenciais no revestimento e das deformações nas interfaces das pastilhas. Ela contribui, ainda, para a redução da pressão interna na vareta, devido ao aumento de vazios para acomodar gases de fissão, importante no desempenho da vareta combustível. A altura da concavidade deve ser especificada com um valor maior que o obtido pelo alongamento axial da pastilha de faces planas ( $0.0126L$ ). Isto garante que a expansão axial máxima no centro do combustível não ultrapassa a da borda na face da pastilha. Para a determinação da borda, várias configurações com diferentes larguras de bordas podem ser pesquisadas. No cálculo desenvolvido, uma borda de  $0.15R$  na configuração 3 não leva a um alongamento axial maior que o obtido nas configurações 1 e 2 e ela poderia ser utilizada no dimensionamento da pastilha. O procedimento permite, ainda, avaliar diferentes razões  $l/d$  da pastilha. Como visto, menores relações  $l/d$  levam a uma diminuição da deformação no revestimento. O chanfro de  $45^\circ$ , apesar de aumentar as deformações ao longo da pastilha, reduz as ondulações circunferenciais, as deformações nas interfaces e diminui a probabilidade de formação de lascas de pastilha durante o seu carregamento na vareta.

## V. CONCLUSÃO

A análise com um programa estrutural em elementos finitos das deformações desenvolvidas em diferentes geometrias de pastilhas  $UO_2$  sob um gradiente térmico permitiu estabelecer um procedimento de cálculo para a especificação geométrica da pastilha. Parâmetros geométricos com dupla concavidade, menores razões  $l/d$ , bordas mais largas e chanfro de  $45^\circ$  na pastilha reduzem deformações no revestimento durante rampas de potência. Os parâmetros podem ser parametrizados para a sua quantificação com o procedimento de cálculo aplicado.

## VI. BIBLIOGRAFIA

- /1/ CARTER, T.J. - Experimental Investigation of various Pellets Geometries to Reduce Strains in Zirconium Alloy Cladding.  
In: Nuclear Technology vol. 45 September, 1979.
- /2/ ROLSTAD, E.; KNUDSEN, K.D. - Studies of Fuel-Clad Mechanical Interaction and the resulting Interaction Failure Mechanisms.  
IN: Nuclear Technology vol.13 - February, 1972
- /3/ BATH, K.; WILSON, E.L.; PETERSON, F.E. - SAP-IV - A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems - Report EERC 73-11 - June, 1973.
- /4/ BERNA, G.A.; BOHN, M.P.; COLEMAN, D.R. - FRAPCON-1 A Computer Code for the Steady State Analysis of Oxide Fuel Rods - Idaho National Engineering Laboratory - Report CDAP-TR-78-032-R1 - November, 1978.
- /5/ HAGMAN, D.L. et al - MATPRO - A Handbook of Material Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior - Report EG&G Idaho INC - Nureg/CR - 0497-1979.

## VII. FIGURAS

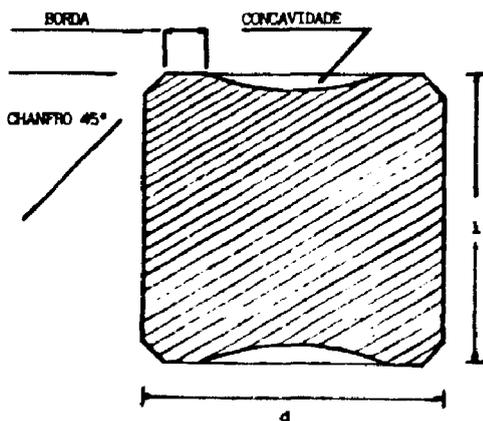


FIG. 1: Seção da pastilha  $UO_2$  mostrando os parâmetros geométricos.

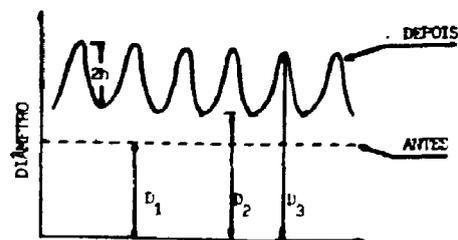


FIG. 2: Diâmetro esquemático da vareta combustível antes e após a irradiação /1/.

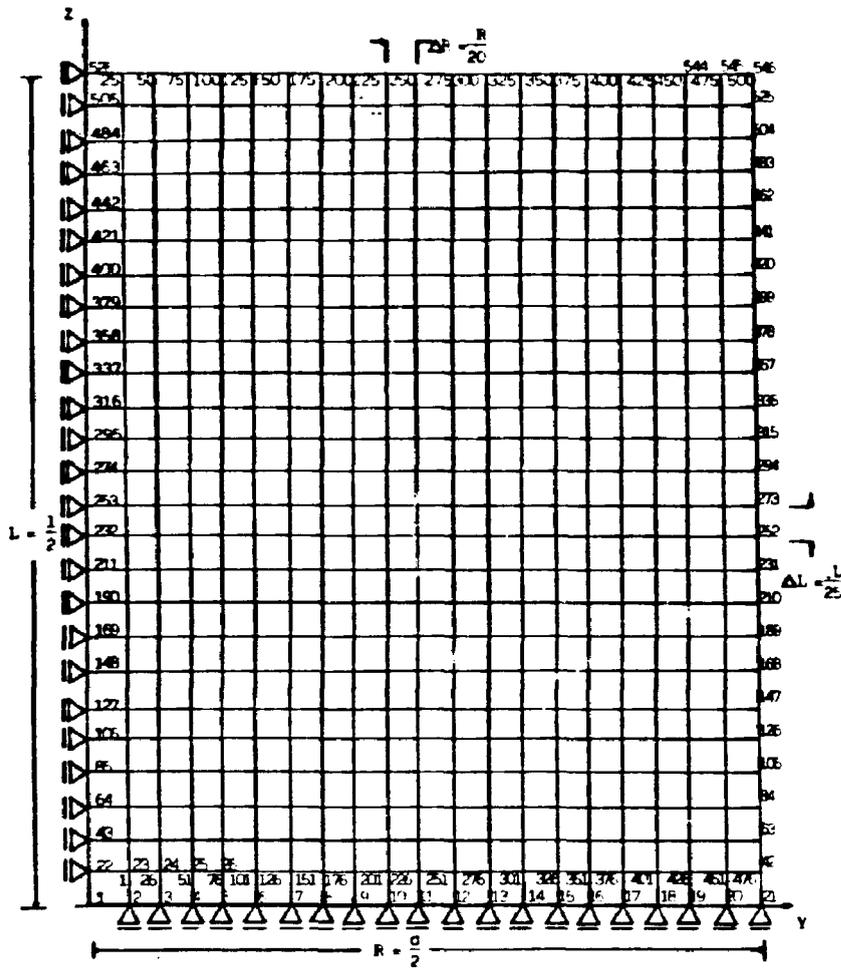


FIG. 3: Representação da malha de elementos.

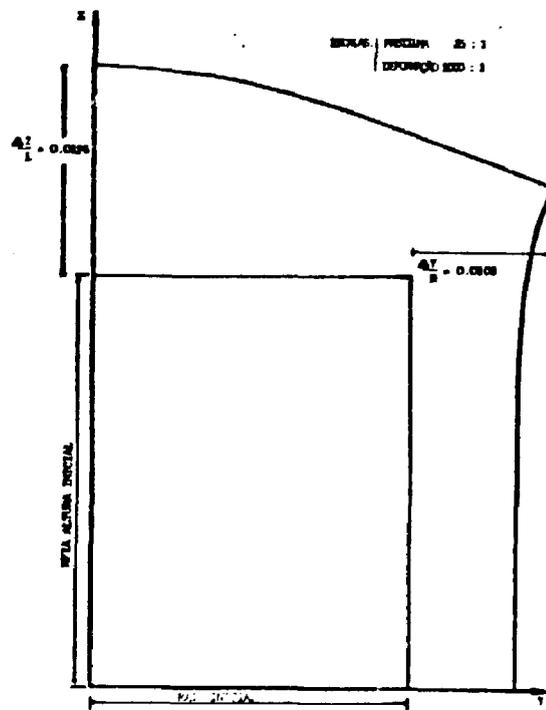


FIG. 4: Perfil da pastilha deformada.

Raio da Pastilha

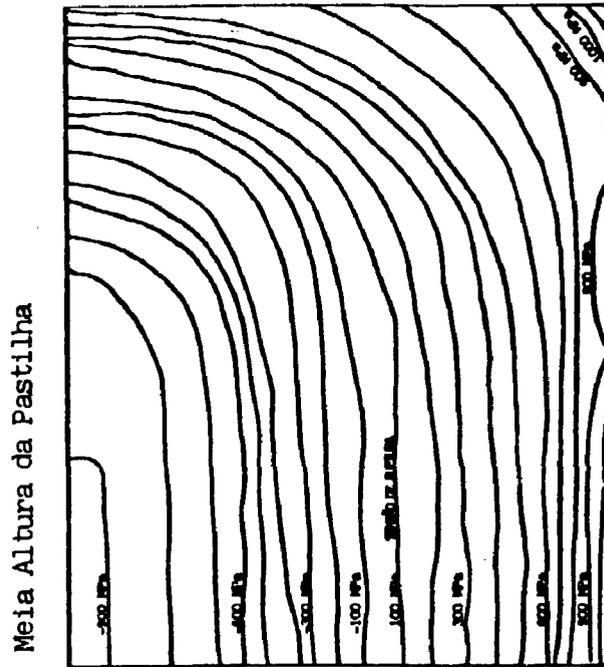


FIG. 5: Distribuição das tensões tangenciais ao longo da pastilha (tensão de ruptura = 100 MPa).

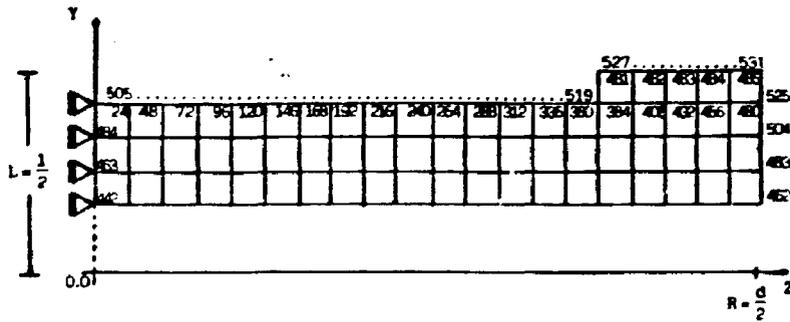


FIG. 6: Aspecto da malha de elementos com uma concavidade.

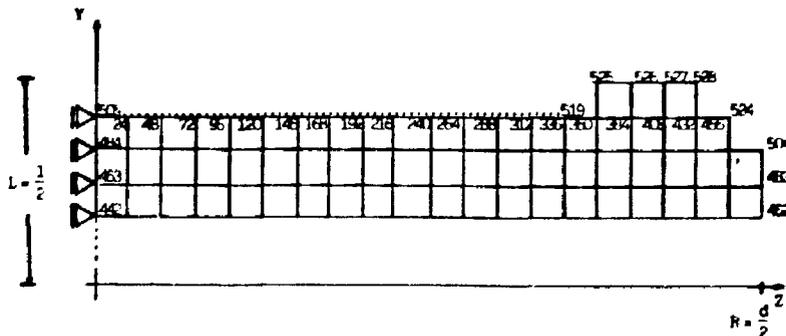


FIG. 7: Aspecto da malha de elementos com uma concavidade, borda e chanfro.

VIII. TABELAS

Tab. 1: Sumário de redução (↓) e aumento (↑) de deformações no revestimento com a variação da geometria da pastilha /1/.

Test Mentory	Circumferential Ridge Height	Stress		
		Feet Interface	Feet Midlength	Anti
U-230	↓ small H <sub>0</sub>	↓ small H <sub>0</sub>	No effect	↓ small H <sub>0</sub>
DNE-143 (Caster melting)	↓ small H <sub>0</sub> ↓ increased dish volume	↓ small H <sub>0</sub> (before ramp) ↑ small H <sub>0</sub> (during ramp) ↓ increased dish volume	↑ small H <sub>0</sub> during ramp ↓ increased dish volume	↑ small H <sub>0</sub> during ramp
U-234	↓ small H <sub>0</sub> ↓ wide shoulder ↓ edge chamfer	↓ small H <sub>0</sub> ↓ wide shoulder ↓ edge chamfer	↓ small H <sub>0</sub> ↑ edge chamfer	↓ small H <sub>0</sub> ↑ wide shoulder
DNE-172	↓ small H <sub>0</sub> ↓ wide shoulder ↓ edge chamfer	↓ small H <sub>0</sub> ↓ wide shoulder ↓ edge chamfer	↓ small H <sub>0</sub> (slight effect) ↑ chamfer (↑)	↑ wide shoulder ↓ small H <sub>0</sub>
DNE-145 (Double versus single dishing)	No reasonable effect	↓ double dishing	↓ double dishing	↓ double dishing

Tab. 2: Dados de entrada do programa SAP-IV.

Nos Radiais	Raio de Pastilha $\Delta R/R$ (m/m)	Temperatura de Pastilha T (°C)	Coefficiente de Expansão Térmica $\alpha$ ( $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	Módulo de Elasticidade E $10^{11} \text{ (N/m}^2\text{)}$
1	0.00	1373.5	1.084	1.5886
2	0.05	1371.6	1.085	1.5884
3	0.10	1367.2	1.083	1.5897
4	0.15	1354.2	1.079	1.6025
5	0.20	1334.7	1.073	1.6067
6	0.25	1309.2	1.066	1.6121
7	0.30	1278.2	1.057	1.6187
8	0.35	1241.9	1.047	1.6264
9	0.40	1200.8	1.036	1.6351
10	0.45	1155.3	1.021	1.6448
11	0.50	1105.7	1.007	1.6554
12	0.55	1152.6	0.992	1.6667
13	0.60	996.2	0.975	1.6786
14	0.65	937.0	0.938	1.6912
15	0.70	875.3	0.940	1.7044
16	0.75	811.6	0.922	1.7179
17	0.80	746.3	0.903	1.7318
18	0.85	679.7	0.884	1.7460
19	0.90	612.3	0.864	1.7603
20	0.95	544.3	0.844	1.7749
21	1.00	476.4	0.825	1.7899

Tab. 3: Deformações radiais ( $\Delta Y/Y$ ) e axiais ( $\Delta Z/Z$ ) obtidas para diferentes geometrias de pastilhas pela aplicação de um gradiente térmico.

CONFIGURAÇÃO 1			CONFIGURAÇÃO 2			CONFIGURAÇÃO 3		
N6	$\Delta Y/Y$	$\Delta Z/Z$	N6	$\Delta Y/Y$	$\Delta Z/Z$	N6	$\Delta Y/Y$	$\Delta Z/Z$
526		<u>0.0126</u>	505		<u>0.0122</u>	505		<u>0.0122</u>
529		0.0123	508		0.0119	508		0.0119
532		0.0115	511		0.0112	511		0.0112
535		0.0104	514		0.0100	514		0.0100
538		0.0090	517		0.0087	517		0.0087
541		0.0076	526		<u>0.0075</u>	525		<u>0.0075</u>
544		0.0063	529		0.0062	528	0.0105	0.0062
546	<u>0.0103</u>	0.0055	531	<u>0.0105</u>	0.0054	524	0.0101	0.0056
504	0.0095		504	0.0097		504	<u>0.0101</u>	
441	0.0087		441	0.0088		441	0.0091	
378	0.0082		378	0.0083		378	0.0084	
315	0.0081		315	0.0081		315	0.0081	
252	0.0080		252	0.0080		252	<u>0.0080</u>	
189	0.0080		189	0.0080		189	0.0080	
126	0.0080		126	0.0080		126	0.0080	
63	0.0081		63	0.0080		63	0.0080	
21	0.0081		21	0.0080		21	0.0080	