

CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

**METODOLOGIA DE PROJETO DE VARETAS COMBUSTÍVEIS DE
REATORES DE ÁGUA LEVE PRESSURIZADA**

Antonio Teixeira e Silva e Armando Margotto Esteves

IPEN - PUB - - 186.

PUBLICAÇÃO IPEN 186

AGOSTO/1988

SÃO PAULO

**METODOLOGIA DE PROJETO DE VARETAS COMBUSTÍVEIS DE
REATORES DE ÁGUA LEVE PRESSURIZADA**

Antonio Teixeira e Silva e Armando Margotto Esteves

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE REATORES

**CNEN/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO – BRASIL**

Série PUBLICAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

E32.00

COMPUTER - AIDED DESIGN

F CODES

FINITE ELEMENT METHOD

FUEL RODS

PWR TYPE REACTORS

IPEN - Doc - 3062

Publicação aprovada pela CNEN em 17/10/87

Nota: A redação, ortografia, conceitos e revisão final são de responsabilidade do(s) autor(es).

METODOLOGIA DE PROJETO DE VARETAS COMBUSTÍVEIS DE REATORES DE ÁGUA LEVE PRESSURIZADA*

Antonio Teixeira e Silva e Armando Margotto Esteves

RESUMO

O código de desempenho do combustível, FRAPCON-1, e o código estrutural em elementos finitos, SAP-IV, são aplicados no estabelecimento de uma metodologia de projeto de varetas combustíveis de reatores de água leve pressurizada. O procedimento de cálculo aplicado permite dimensionar os diversos componentes da vareta combustível e caracterizar a sua pressão interna.

PRESSURIZED WATER REACTOR FUEL ROD DESIGN METHODOLOGY

ABSTRACT

The fuel performance program FRAPCON-1 and the structural finite element program SAP-IV are applied in a pressurized water reactor fuel rod design methodology. The applied calculation procedure allows to dimension the fuel rod components and characterize its internal pressure.

I. INTRODUÇÃO

O principal objetivo do projeto de uma vareta combustível é garantir que nenhum defeito ocorrerá nesta vareta, devido aos carregamentos aos quais ela está submetida durante a sua operação no reator. A integridade da vareta é garantida pela adoção de limites impostos aos carregamentos atuantes e determinados pelos critérios de projeto.

Neste trabalho é desenvolvida uma metodologia de projeto de varetas combustíveis de reatores de água leve pressurizada (PWRs). A metodologia consiste de uma sequência de cálculos desenvolvidos com o código de desempenho do combustível, FRAPCON-1 /2/, e o código estrutural em elementos finitos, SAP-IV /1/, que permitem verificar o melhor dimensionamento para os diversos componentes da vareta combustível: pastilha de dióxido de urânio (UO_2), "plenum", mola de inconel ou de aço inoxidável, pastilhas de alumina (Al_2O_3) e revestimento de zircaloy. É possível, ainda, caracterizar a pressão interna na vareta.

Simulações com o código FRAPCON-1 permitem estabelecer uma investigação detalhada da interligação dos efeitos térmicos, mecânicos, gás interno e propriedades materiais no comportamento da vareta combustível a

(*) Trabalho apresentado no 2º Congresso Geral de Energia Nuclear, realizado no Rio de Janeiro, de 24 a 29 de abril de 1988.

ser projetada. Os cálculos nestas simulações são desenvolvidos através de uma combinação não favorável de fatores, que levam as situações mais extremas em termos da potência local e dos carregamentos atuantes, e possibilitam obter resultados para a vareta combustível que possam ser comparados com os limites e critérios de projeto estabelecidos.

II. CRITÉRIOS E LIMITES DE PROJETO

Os limites e critérios impostos a vareta combustível durante operação normal em reatores de água leve pressurizada são apresentados a seguir:

- 1- A temperatura máxima no centro do combustível não deve exceder a temperatura de fusão do combustível (limite assumido: $T_c \leq 2500$ °C).
- 2- A pressão interna máxima na vareta deve ser menor do que a pressão nominal do refrigerante.
- 3- Critérios de tensões no revestimento:
 - a) A tensão de membrana primária deve ser menor ou igual a $0,9 S_y$ (tensão de escoamento do material) e $0,5 S_r$ (tensão de ruptura do material).
 - b) A tensão de membrana primária mais a tensão de flexão, devem ser menor ou igual a $1,35 S_y$ e $0,7 S_r$.
 - c) A tensão de membrana primária mais a secundária mais a de flexão, devem ser menor ou igual a $2,7 S_y$ e S_r .
- 4- A deformação equivalente máxima de revestimento menor que 1%.
- 5- O dano acumulado de ciclos de deformação no revestimento deve ser menor que o limite de fadiga determinado em testes experimentais.
- 6- A espessura da camada de óxido formada sobre a parede externa do revestimento devido à corrosão uniforme ao longo da queima deve ser menor que $70 \mu\text{m}$.
- 7- A concentração média de hidrogênio no revestimento (espessura média) deve ser menor ou igual a 500 ppm.

III. DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DA VARETA COMBUSTÍVEL

III. 1 DIMENSIONAMENTO DA PASTILHA COMBUSTÍVEL UO_2

A aplicação de rampas de potência em PWRs induz a formação de um elevado gradiente térmico na pastilha de UO_2 , levando à sua deformação e à formação de rachaduras. O efeito da expansão térmica associado a relocalização de fragmentos de pastilha, pode levar a interação pastilha-revestimento (PCI), ocasionando deformações no revestimento. Parâmetros geométricos da pastilha, como por exemplo, tamanho da concavidade e borda nas suas faces, chanfros de 45° nas suas extremidades e relação altura-diâmetro influem na deformação imposta ao revestimento, principalmente,

durante a rampa de partida do reator, quando a pastilha não está fragmentada em pequenos pedaços.

O dimensionamento da pastilha de UO_2 consiste na quantificação dos parâmetros geométricos descritos acima.

Esta quantificação é desenvolvida através de simulações com os códigos FRAPCON-1 e SAP-IV. A simulação com o FRAPCON-1 permite calcular o gradiente térmico máximo desenvolvido na pastilha de UO_2 para o determinado projeto do reator. Este gradiente é aplicado a diferentes configurações de pastilha, para as quais são escolhidos os valores adequados para os parâmetros geométricos em questão. Para cada configuração é calculada, através de simulações com o código SAP-IV, as deformações na pastilha sob o gradiente térmico máximo. Os resultados são analisados e a configuração que fornece as menores deformações na pastilha e que, conseqüentemente, impõe as menores deformações ao revestimento é escolhida para o projeto. Normalmente, a configuração de pastilha com dupla concavidade e bordas nas faces e chanfros de 45° nas extremidades impõe menores deformações ao revestimento durante uma rampa de potência e é, desta forma, escolhida no projeto do reator /4/.

III. 2 DIMENSIONAMENTO DO "PLENUM"

O comprimento do "plenum" da vareta combustível a ser projetada é especificado através de simulações com o código FRAPCON-1. Nestas simulações, diferentes comprimentos de "plenum" são testados, mantendo todos os outros dados de entrada do código constantes. Os resultados das simulações estabelecem o comprimento do "plenum" que melhor se adapte ao projeto da vareta. Um exemplo é aplicado para a vareta combustível da Central de Angra-1. Dois comprimentos de "plenum" são testados: 88.2 cm e 176.4cm. A figura 1 apresenta o histórico de potência aplicado na simulação e as figuras 2 e 3 apresentam os resultados para a temperatura central no combustível e a pressão interna na vareta, que na condição a frio inicial tem um valor de 3,10 MPa. Das figuras 2 e 3, nota-se que no início da queima, como a condutividade térmica da folga entre pastilha e revestimento é praticamente igual para os dois comprimentos de "plenum", a temperatura no centro do combustível permanece a mesma para os dois casos. A pressão interna na vareta é tanto maior quanto menor o comprimento do plenum, devido ao menor volume para acomodação do gás hélio. Com a densificação do combustível devido ao aumento da folga pastilha-revestimento, a temperatura aumenta e a pressão diminui. Maiores temperaturas conduzem à maior expansão térmica do combustível. Esta expansão, associada ao inchamento do combustível durante a irradiação, tende a fechar a folga entre pastilha e revestimento, levando a uma diminuição da temperatura nos dois casos analisados.

Para a vareta com comprimento de "plenum" de 88.2 cm, maiores expansões térmicas e menores folgas são obtidas, devido às maiores temperaturas no início da irradiação. Maiores temperaturas levam à uma

maior liberação de gases de fissão. O efeito desta liberação leva a uma diminuição da condutância da folga pastilha-revestimento, predominando sobre os dois outros efeitos acima. Isto acarreta maiores temperaturas na vareta com comprimento de plenum de 88,2 cm. Uma maior liberação de gases e uma menor folga pastilha-revestimento levam à uma pressão interna maior nesta mesma vareta.

O comprimento do "plenum" da vareta de Angra-1 é de 176,4 cm. Nota-se que a este valor são obtidas temperaturas e pressões internas menores na vareta combustível, o que por si só justifica a sua escolha.

III. 3 CARACTERIZAÇÃO DA PRESSÃO INTERNA NA VARETA COMBUSTÍVEL

A metodologia para caracterização da pressão interna na vareta é a mesma aplicada para a determinação do comprimento do "plenum". Através de simulações com o código FRAPCON-1, diferentes valores de pressão interna são testados, mantendo todos os outros dados de entrada do código constantes. Os resultados das simulações para as temperaturas na vareta, pressão interna, tensões e deformações no revestimento permitem caracterizar o valor da pressão interna inicial na vareta apropriada para o projeto em questão.

III. 4 DIMENSIONAMENTO DA MOLA DE FIXAÇÃO DA COLUNA DE PASTILHAS

A mola no "plenum" da vareta combustível é utilizada para sustentar a coluna de pastilhas durante manuseio e transporte da vareta e fornecer um espaço vazio para acomodar os gases de fissão liberados. No caso de varetas combustíveis com revestimento de zircaloy, ao se elevar a potência no reator, a expansão axial da coluna de pastilhas é maior que a expansão axial do revestimento e acarreta uma diminuição do comprimento do "plenum" e, conseqüentemente, o aumento da força de atuação da mola sobre as pastilhas. Quando a coluna densifica sob irradiação no reator, a força da mola diminui. Com a irradiação prolongada, devido ao inchamento do combustível, a coluna de pastilhas aumenta, o comprimento do plenum diminui e a força da mola aumenta novamente. O efeito da contração e expansão da coluna de pastilhas é analisada com o código FRAPCON-1, que fornece os comprimentos máximos e mínimos do "plenum" a serem utilizados para o cálculo da força de sustentação da mola. A mola deve ser projetada para manter durante a irradiação uma força de 2 a 3 vezes ao peso da coluna de pastilhas (no caso, pastilhas de UO_2 mais pastilhas de Al_2O_3). A formulação matemática para cálculo da mola pode ser obtida da referência /3/.

Outro aspecto a ser considerado em molas de fixação é a relaxação no tempo devido às altas temperaturas e à irradiação. A simulação com o código FRAPCON-1 do histórico de operação da vareta permite estimar as temperaturas no "plenum" e a fluência máxima adotadas para os cálculos da relaxação da mola.

III.5 DIMENSIONAMENTO DAS PASTILHAS DE Al_2O_3

Pastilhas de alumina (Al_2O_3) são utilizadas em algumas varetas combustíveis de PWRs entre a mola e a coluna de pastilhas de UO_2 e entre esta coluna e o tampão inferior. Em termos de comportamento sob irradiação, as pastilhas de Al_2O_3 devem obedecer as seguintes especificações:

- 1) sustentar o peso da coluna de pastilhas e a força aplicada pela mola sem se fragmentar;
- 2) evitar o contato com o revestimento;
- 3) servir de isolante térmico entre o "plenum" e a coluna de pastilhas de UO_2 e entre esta e o tampão inferior.

O código SAP-IV verifica as tensões desenvolvidas nas pastilhas de Al_2O_3 , devido a força da mola, o peso da coluna de pastilhas de UO_2 e o gradiente térmico aplicado. Estas tensões são baixas e não levam a fragmentação das pastilhas.

O contato entre as pastilhas de Al_2O_3 e o revestimento pode ocorrer devido à expansão térmica e ao inchamento da alumina sob irradiação. O coeficiente de expansão térmica das pastilhas de Al_2O_3 ($6,6$ a $7,5 \times 10^{-6}/C$ entre 300 e $470^\circ C$ /6/) é menor que o coeficiente de expansão térmica do UO_2 ($7,8$ a $9,6 \times 10^{-6}/C$ entre 550 e $1100^\circ C$ /5/) nas temperaturas envolvidas no reator. Desta forma, o contato só é possível através do inchamento da alumina sob irradiação, uma vez que este pode ser maior que o das pastilhas de UO_2 . O inchamento da alumina é calculado para a fluência máxima atingida na vareta e o diâmetro da pastilha é projetado para acomodá-lo, evitando o contato com o revestimento.

O efeito isolante da alumina é normalmente verificado para as pastilhas situadas entre a mola e a coluna de pastilhas de UO_2 . Supondo um contato facial perfeito entre a pastilha de UO_2 e as pastilhas de Al_2O_3 , a queda de temperatura é aproximada por $T=q''/KA$ onde, q'' é o fluxo de calor na pastilha de UO_2 (calculado pelo FRAPCON-1) e K e A são respectivamente, a condutividade térmica /6/ e a altura das pastilhas de Al_2O_3 . Se esta queda de temperatura é maior que a diferença de temperatura entre a pastilha de UO_2 e o "plenum" da vareta combustível, o efeito isolante da pastilha de Al_2O_3 é comprovado.

III.6 DIMENSIONAMENTO DO REVESTIMENTO E VERIFICAÇÃO DE CRITÉRIOS E LIMITES DE PROJETO

Simulações com o código FRAPCON-1 permitem estabelecer o melhor dimensionamento para o revestimento da vareta combustível. Os cálculos são desenvolvidos através de uma combinação não favorável de fatores, onde a situação mais extrema em termos de potência local pode ocorrer. Os resultados das simulações são programados para fornecer os seguintes parâmetros:

- 1) temperaturas máximas na vareta;
- 2) tensões e deformações no revestimento no início da irradiação;

- 3) pressão interna máxima na vareta;
- 4) tensões e deformações no revestimento durante a irradiação;
- 5) espessura da camada de óxido no revestimento;
- 6) quantidade máxima de hidrogênio absorvida no revestimento;
- 7) número de ciclos de deformações do revestimento.

Os parâmetros de entrada são selecionados e combinados de forma a maximizar os efeitos mais desfavoráveis. O cálculo de temperatura no combustível é desenvolvido, escolhendo-se a geometria da vareta que maximiza o seu valor, como por exemplo, folga máxima entre pastilha e revestimento. A análise de tensões no revestimento é desenvolvida para duas situações:

- a) vareta combustível com mínima geração de calor, que leva à diferença de pressão máxima nas paredes do revestimento.
- b) vareta combustível com uma taxa de geração linear local máxima, que leva às maiores tensões térmicas no revestimento.

Os cálculos durante a vida da vareta combustível, ao contrário do que ocorre no início da vida, levam em consideração a dependência no tempo de parâmetros relevantes (por exemplo: fluência ("creep")). Esta consideração é feita através do histórico de potência, que é escolhido, conservativamente, de forma a maximizar os carregamentos atuantes. O histórico de potência com a queima máxima é escolhido para investigar o limite de pressão interna e os carregamentos máximos, porque levam à máxima fluência do revestimento. Além disso, simulações são desenvolvidas levando-se em conta as tolerâncias nas dimensões dos componentes da vareta, sobrepotência e sobrepressão no reator. Os resultados obtidos são comparados aos limites e critérios de projeto apresentados no capítulo II e permitem estabelecer o melhor dimensionamento para a vareta em questão.

Dentre os limites e critérios de projeto apresentados no capítulo II, não é possível, através de simulações com o FRAPCON-1, estender comparações para os critérios de tensão estabelecidos. O código fornece nos seus resultados de saída apenas as tensões de membrana primária, devido ao carregamento de pressão no revestimento. As tensões devido a outros carregamentos na vareta não são considerados no código FRAPCON-1. Esses carregamentos incluem:

- 1) a força de pré-compressão da mola de fixação;
- 2) os gradientes de temperaturas no revestimento;
- 3) a força axial de fixação da vareta na grade espaçadora;
- 4) as expansões diferenciais térmicas e devido à irradiação;
- 5) as forças induzidas pelo fluido refrigerante.

A influência destes carregamentos nas tensões geradas no revestimento deve ser analisada em uma formulação a parte. As tensões calculadas nesta formulação incluem as tensões térmicas geradas pelo gradiente de temperatura, as de flexão, geradas pela ovalização do tubo e pelas forças induzidas pelo escoamento do fluido refrigerante e as tensões na região da solda tampão-revestimento. Os dados necessários para o cálculo

são fornecidos pelas diversas simulações com o código FRAPCON-1.

IV. CONCLUSÃO

Os procedimentos de cálculo aplicados com os códigos FRAPCON-1 e SAP-IV permitiram estabelecer uma metodologia de projeto de varetas combustíveis de PWRs. Os cálculos desenvolvidos permitem obter resultados para a vareta combustível que podem ser comparados aos limites e critérios de projeto estabelecidos para operação normal no reator e servem de base para o dimensionamento de seus componentes. Simulações do comportamento da vareta combustível com o código FRAPCON-1 fornecem apenas os resultados para a tensão de membrana primária no revestimento, devido ao carregamento de pressão. Uma formulação a parte tem de ser desenvolvida para o cálculo das tensões no revestimento, devido a outros carregamentos na vareta.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BATH, K.; WILSON, E.L.; PETERSON, F.E. SAP-IV: a structural analysis program for static and dynamic response of linear systems. Berkeley, Calif., Earthquake Engineering Research Center, June 1973. (EERC-73-11).
2. BERNA, G.A.; BOHN, M.P.; COLEMAN, D.R. FRAPCON 1: a computer code for the steady-state analysis of oxide fuel rods. Idaho Falls, Idaho National Engineering Lab., Nov. 1978. (CDAP-TR-78-032-R1).
3. SHIGLEY, J.E. & MITCHEL, L.D. Mechanical engineering design. New York, MacGraw Hill, 1983.
4. SILVA, A.T. Dimensionamento geométrico das pastilhas UO_2 de PWRs. In: Energia nuclear: congresso geral de energia nuclear, realizado no Rio de Janeiro, 23 a 29 de abril, 1988. p 315-24.
5. SILVA, A. T. & PERROTTA, J.A. Alguns aspectos da utilização de Zircaloy e aço inoxidável austenítico como material de revestimento de varetas combustíveis de PWRs. In: Física de reatores: 5º Encontro nacional de...realizado no Rio de Janeiro, 10-12 de abril, 1985. p. 649-62.
6. STRASSER, A. & YARIO, W. Control rod materials and burnable poisons: an evaluation of the state of the art and needs for technology development. Oak Ridge, Tenn., USAEC Technical Information Center, July 1980. (NP-1974) (EPRI CONTRACT TPS-79-708)

VI. FIGURAS

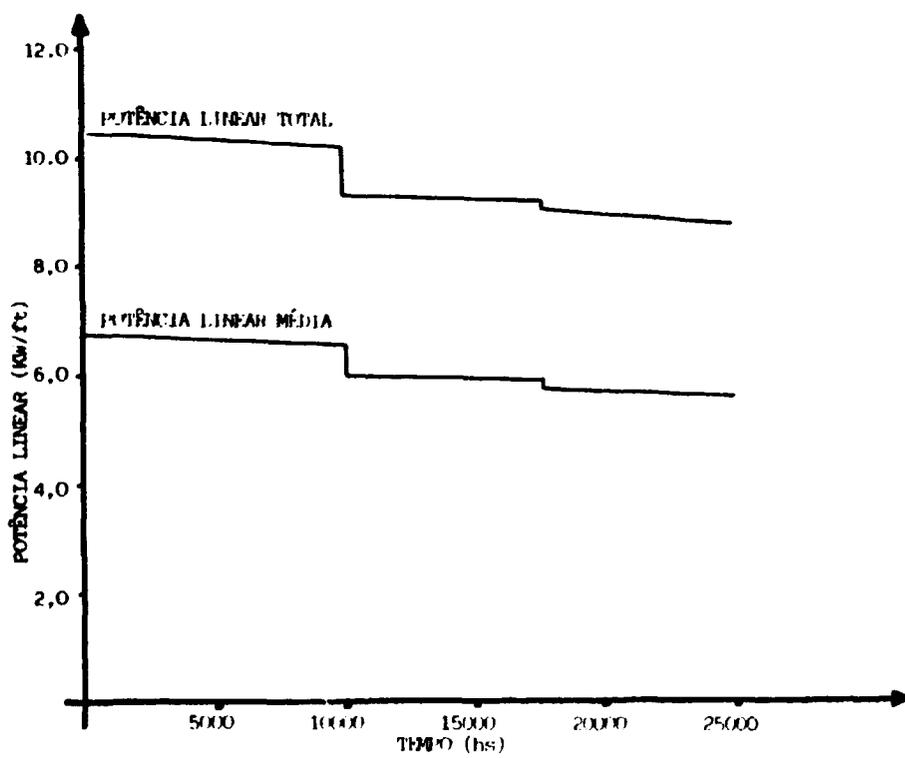


FIG. 1: Histórico de Potência de Angra-1.

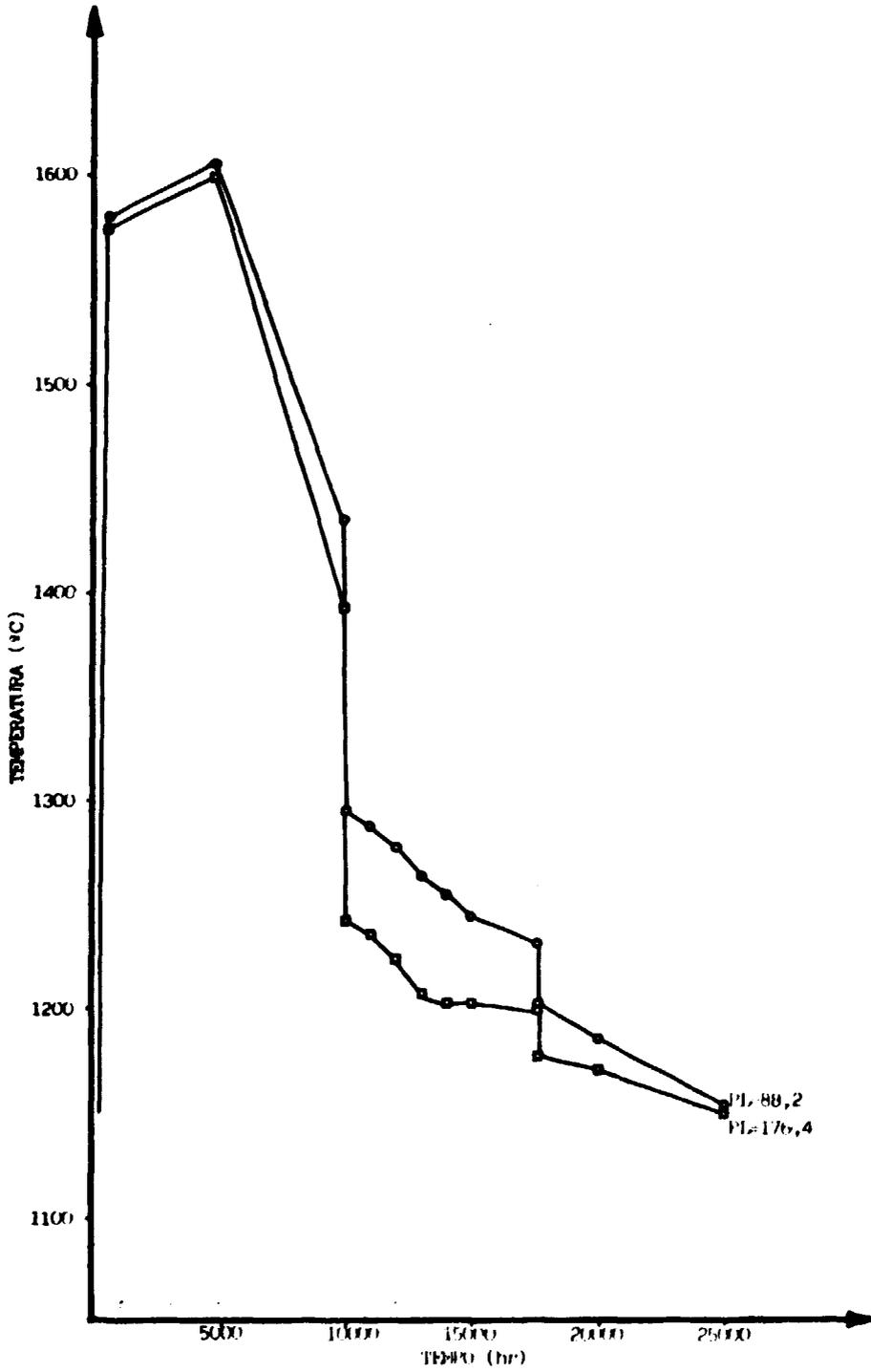


FIG. 2: Temperatura central no combustível versus tempo de irradiação.

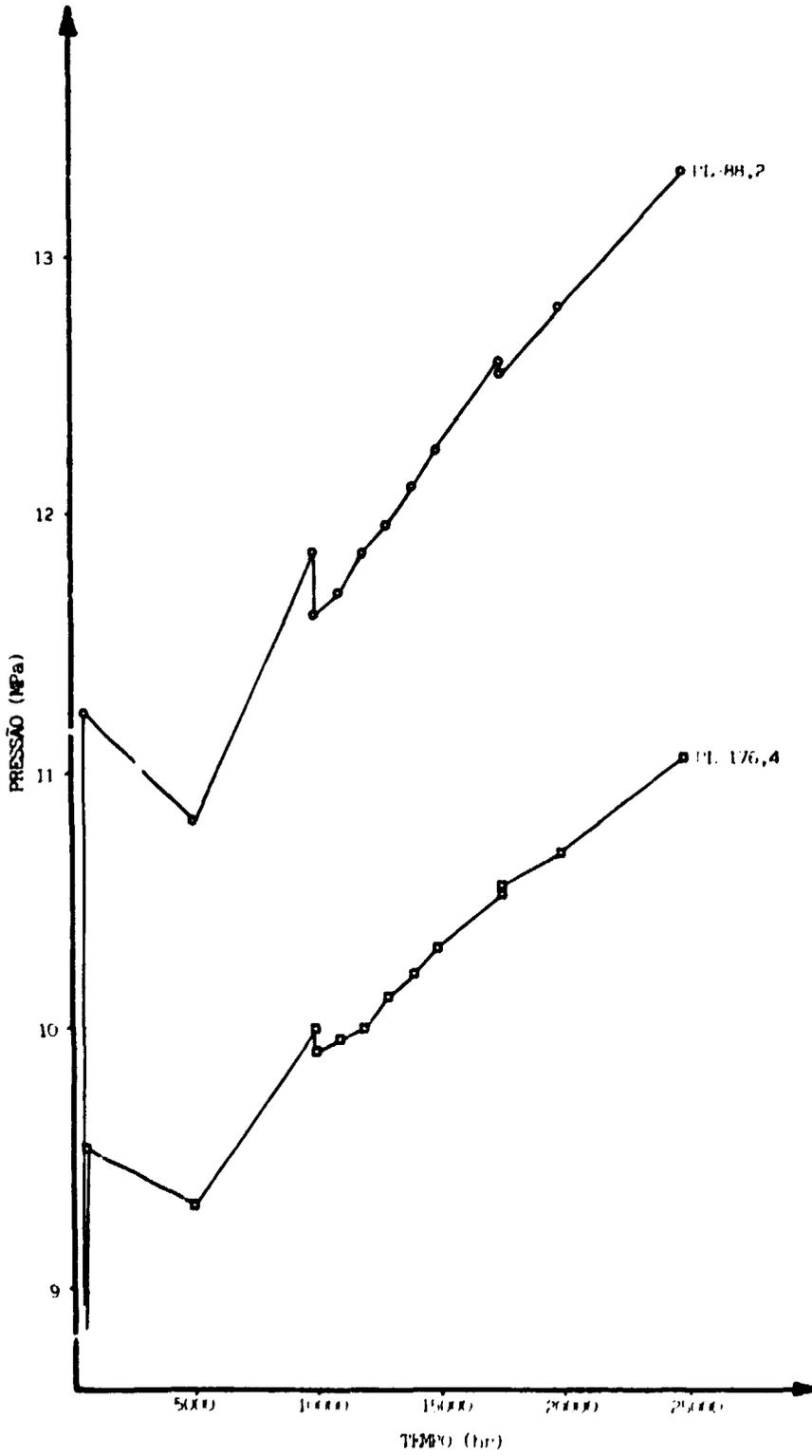


FIG. 3: Pressão interna versus tempo de irradiação.