

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

Antonio Teixeira e Silva  
Armando Margotto Esteves

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 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.

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 /1/, e o código estrutural em elementos finitos, SAP-IV /2/, 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 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  $0,09 S_y$  (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  $70 \mu m$ .

- 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 relocação de fragmentos de pastilha, pode levar a interação pastilha-revestimento (PCI), ocasionando de formações no revestimento. Parâmetros geométricos da pastilha como por exemplo, tamanho da concavidade e borda nas suas faces, chanfros de  $45^\circ$  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  $45^\circ$  nas extremidades impõe menores deformações ao revestimento durante uma rampa de potência e é, desta forma, escolhida no projeto do reator /3/.

#### 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 de "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 176.4 cm. 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 uma 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 à 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 superior 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 /4/.

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 estacoluma 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  $470 C$  /5/) é menor que o coeficiente de expansão térmica do  $UO_2$  ( $7,8$  a  $9,6 \times 10^{-6}/C$  entre  $550$  e  $1100 C$  /6/) 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 /5/ 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 gerados 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. BIBLIOGRAFIA

- /1/ BERNA, G.A.; BOHN, M.R.; 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.
- /2/ 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.
- /3/ SILVA, A.T. - Dimensionamento Geométrico das Pastilhas UO<sub>2</sub> de PWRs - a ser apresentado no 2º CGEN - Abril, 1988.
- /4/ SHIGLEY, J.E.; MITCHEL, L.D. : Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill International Book Company, 1983.
- /5/ STRASSER, A.; YARIO, W.: Control Rod Materials and Burnable Poissons; An Evaluation of the State of the Art and Needs for Technology Development - NP - 1974 EPRI CONTRACT TPS 79-708, July 1980.
- /6/ 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 - Anais do V ENFIR, 1984.

VI. FIGURAS

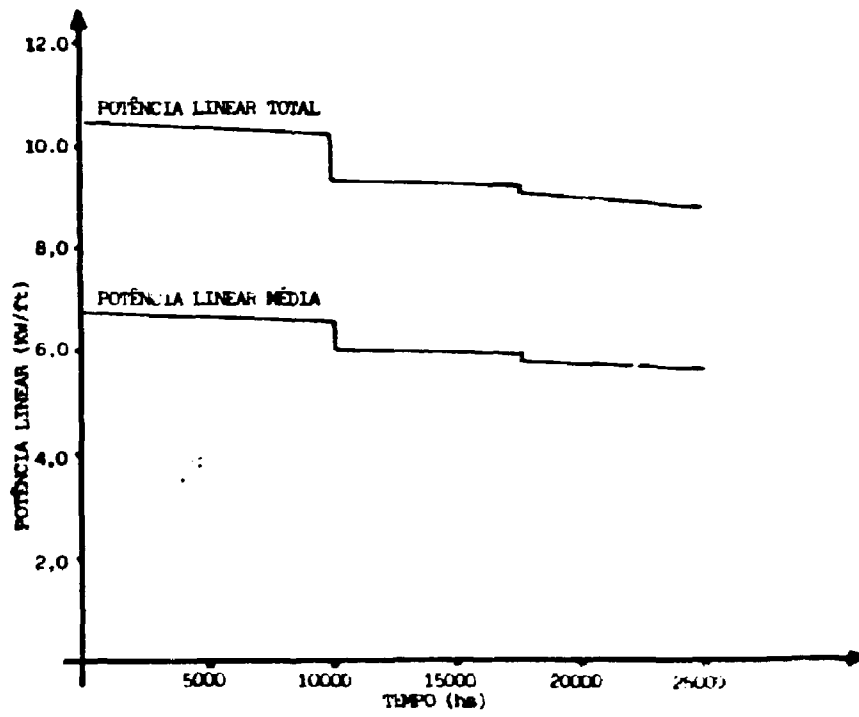


FIG. 1: Histórico de Potência de Angra-1.



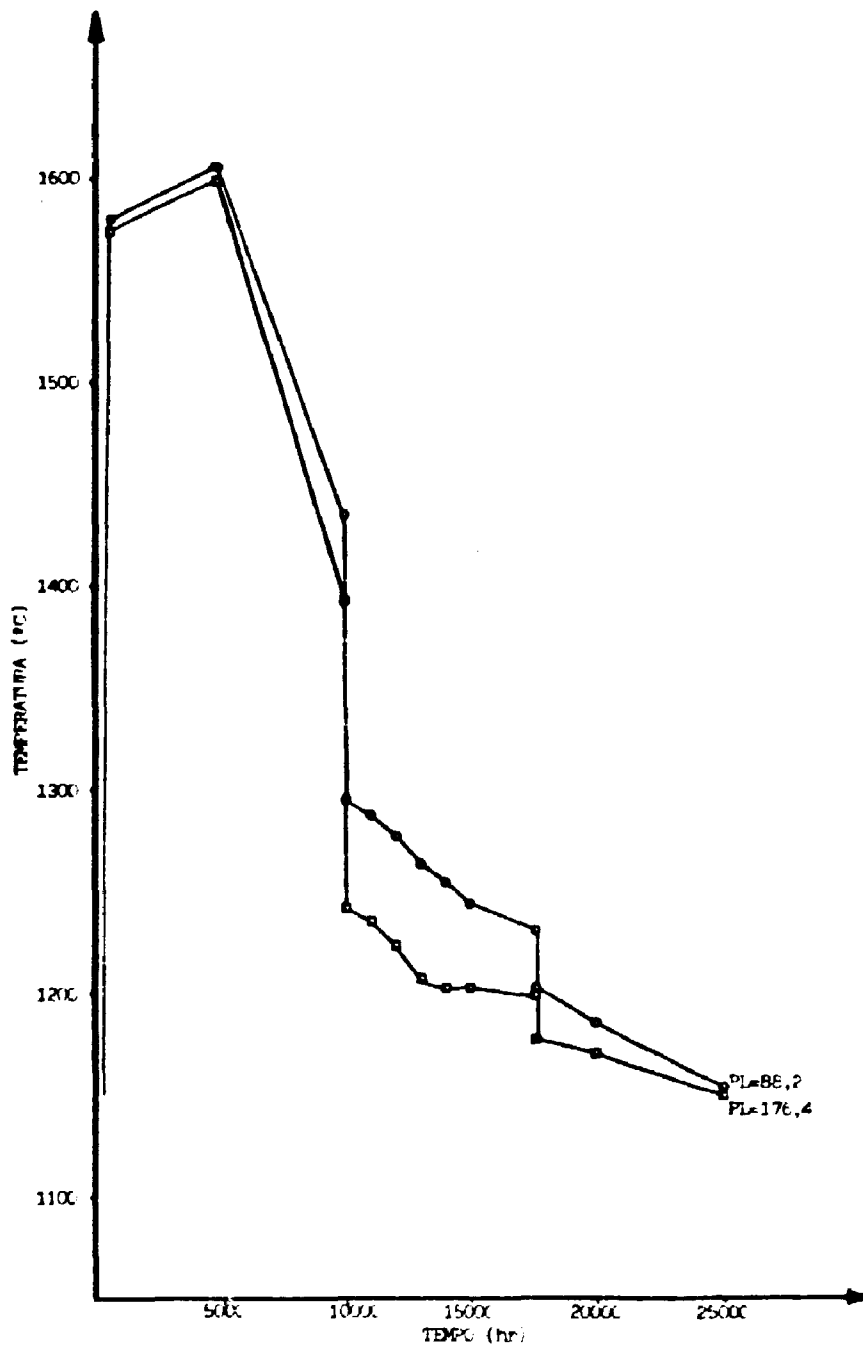


FIG. 2: Temperatura central no combustível versus tempo de irradiação.

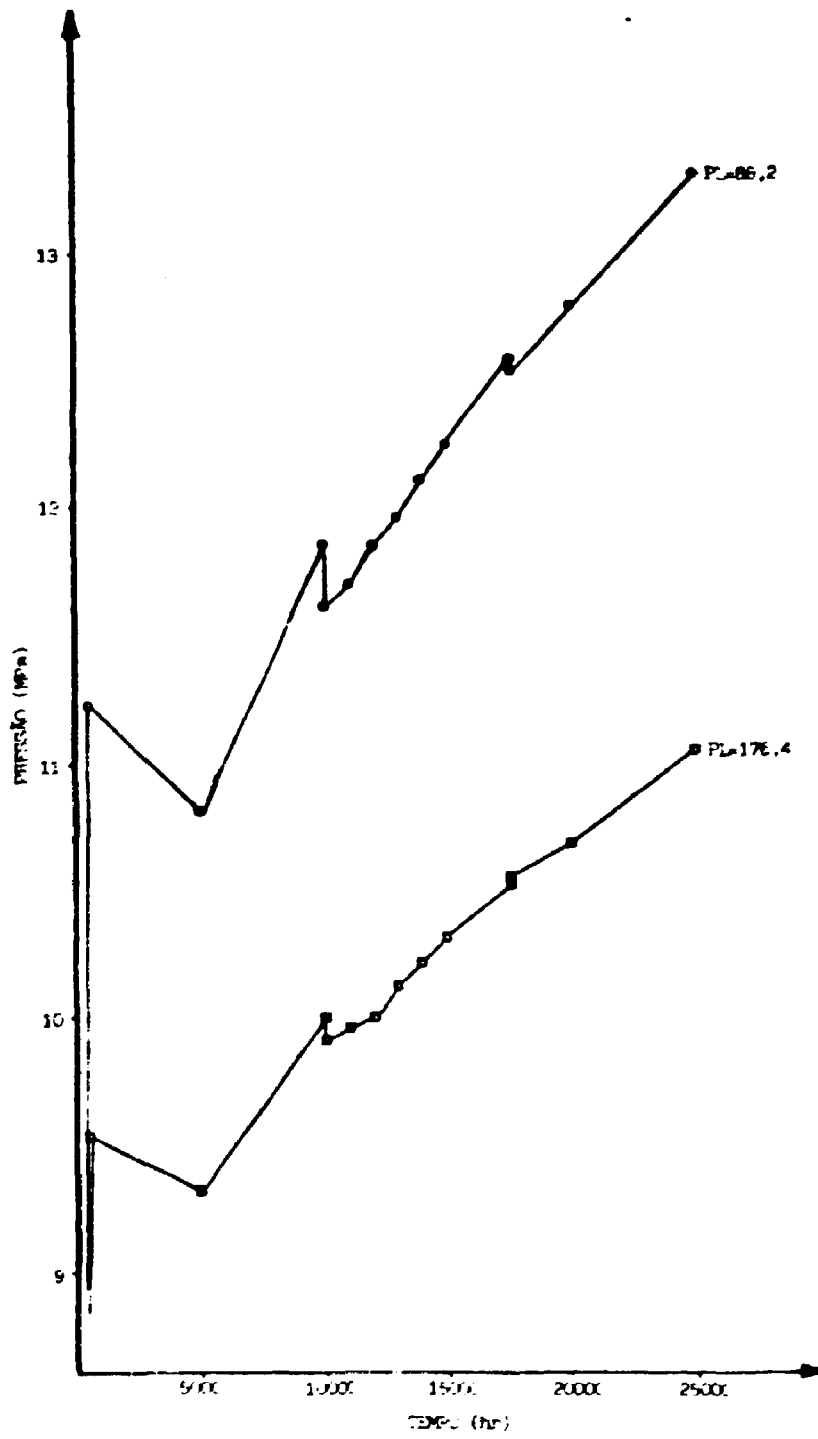


FIG. 3: Pressão interna versus tempo de irradiação.