

INTERLIGAÇÃO DOS CÓDIGOS FRAP-T, FRAPCON E RELAP-4 PARA
ANÁLISE DE TRANSIENTES E ACIDENTES DE VARETAS
COMBUSTÍVEIS DE REATORES DE ÁGUA LEVE

Marra Neto, A. e Silva, A.T.
Divisão de Engenharia do Núcleo
Sabundjian, G. e Conti, T.N.
Divisão de Termo-Hidráulica
Departamento de Tecnologia de Reatores (RT)
IPEN-CNEN/SP

RESUMO

Os códigos computacionais FRAP-T, FRAPCON e RELAP-4 foram interligados para análise do comportamento em condições de transientes e acidentes hipotéticos de varetas combustíveis de reatores de água leve. A interligação RELAP-4 / FRAP-T dinamiza o processo de transferência dos resultados termo-hidráulicos do RELAP-4 necessários como dados de entrada para simulação do comportamento da vareta combustível em regime de transiente e acidente com o FRAP-T. Se os efeitos da queima do combustível devem ser considerados na análise, o FRAPCON fornece os dados em regime permanente para a inicialização do transiente.

Com os dados termo-hidráulicos fornecidos pelo RELAP-4(MOD 3), o FRAP-T6 foi utilizado para analisar o comportamento de uma vareta combustível típica de um reator de água leve pressurizada durante a fase de depressurização em um acidente de perda de refrigerante por grande ruptura na perna fria do circuito primário. Dois casos foram analisados e comparados: sem inicialização e com inicialização do acidente com dados do FRAPCON.

ABSTRACT

The computer codes FRAP-T, FRAPCON, and RELAP-4 have been linked for the fuel rod behavior analysis under transients and hypothetical accidents in light water reactors. The results calculated by thermal hydraulic code RELAP-4 give input in file format into the transient fuel analysis code FRAP-T. If the effect of fuel burnup is taken into account, the fuel performance code FRAPCON should provide the initial steady state data for the transient analysis.

With the thermal hydraulic boundary conditions provided by RELAP-4(MOD 3), FRAP-T6 is used to analyse pressurized water reactor fuel rod behavior during the blowdown phase under large break loss of coolant accident conditions. Two cases have been analysed: without and with initialization from FRAPCON-2 steady state data.

1. Introdução

Os códigos de desempenho do combustível da série FRAP-T (FRAP-T4 [1] e FRAP-T6 [2]) analisam o comportamento de uma vareta combustível em condições hipotéticas de transientes e acidentes, estendendo-se de transientes operacionais suaves a acidentes de perda de refrigerante primário por grande ruptura (APRPGR) e acidentes iniciados por reatividade (AIR). Eles estão restritos à análise de combustíveis de óxido de urânio e plutônio e revestimento de zircaloy.

Os dados de entrada requeridos para a simulação com o FRAP-T especificam a geometria de fabricação da vareta, o histórico de potência e as condições do refrigerante durante o transiente, e a quantidade e o tipo de gás na vareta.

As condições do refrigerante são fornecidas ao FRAP-T por um código de análise termo-hidráulica como o RELAP-4 [3]. Os parâmetros termo-hidráulicos requeridos incluem o histórico da entalpia do "plenum" superior e inferior, da pressão, da vazão, da temperatura e dos coeficientes de transferência de calor entre o refrigerante e o revestimento em um número arbitrário de regiões do núcleo envolvendo a vareta combustível. Existem cinco diferentes opções no FRAP-T para a introdução dos parâmetros termo-hidráulicos provenientes do RELAP-4. Três destas opções são introduzidas via cartões e as outras via fita magnética. É possível ainda fornecer ao FRAP-T pelo RELAP-4, o histórico de potência durante o transiente.

Se os efeitos da queima do combustível devem ser considerados, os códigos de desempenho do combustível da série FRAPCON (FRAPCON-1 [4] e FRAPCON-2 [5]) fornecem os dados em regime permanente para inicialização do transiente com o FRAP-T. Estes dados incluem o inventário dos gases de fissão liberados e retidos no combustível, as deformações permanentes no combustível e no revestimento, a espessura da camada de óxido no revestimento e a quantidade de porosidade aberta no combustível. O número de dados é grande. Dependendo da dimensão do problema, alguns deles correspondem a vetores de até 200 posições, o que torna exaustiva a sua digitação para a inicialização de cada caso de transiente analisado. Para contornar este problema, foram interligados os códigos FRAPCON e FRAP-T via fita magnética. Um grupo de programas computacionais foram desenvolvidos. Estes programas armazenam os dados em regime permanente fornecidos pelo FRAPCON e os transferem no formato adequado para inicialização do transiente com o FRAP-T. Para agilizar a análise, as opções do FRAP-T que permitem a transferência dos dados provenientes do RELAP-4 via fita magnética foram utilizadas. Um programa computacional foi desenvolvido para promover esta interligação.

Se os dados de inicialização do FRAPCON não estão disponíveis, o FRAP-T6 gera as condições da vareta no início do transiente, mas os efeitos da queima não são considerados.

Para verificar a adequabilidade da interligação dos códigos, a compatibilidade dos modelos de cálculo do FRAPCON e do FRAP-T e diferenciar e analisar um transiente não inicializado e inicializado com os dados do FRAPCON, foi desenvolvida uma simulação do comportamento de uma vareta combustível típica de um PWR durante a fase de despressurização de um APRPGR na perna fria do circui

to primário. Os resultados deste estudo foram analisados e discutidos.

2. Interligação dos Códigos FRAP-T/FRAPCON

A Divisão de Engenharia do Núcleo (RT-N) do IPEN-CNEN/SP possui a sua disposição dois códigos da série FRAPCON: o FRAPCON-1 e o FRAPCON-2, que é a versão mais moderna da série. Também estão disponíveis no RT-N dois códigos da série FRAP-T: o FRAP-T4 e o FRAP-T6. Ambos os códigos tem a mesma função, sendo a versão FRAP-T6 a mais moderna e definitiva da série FRAP-T. A qualidade principal do FRAP-T6 em relação ao FRAP-T4 é a possibilidade de selecionar nos seus dados de entrada modelos de cálculo e correlações de propriedades materiais conservativas para a análise do transiente. Estes modelos e correlações seguem a norma de licenciamento para qualificação de programas de cálculo de análise de acidentes em reatores de água leve pressurizada (PWR) [6].

Estudos de validação e comparação destes códigos tem sido desenvolvidos no RT-N, com o intuito de verificar, dentre eles, os mais adequados para cada tipo de análise. Entretanto, o RT-N tem utilizado estes códigos indistintamente na análise do desempenho de varetas combustíveis de PWR, uma vez que apresentam resultados parecidos.

Para o código FRAP-T4, duas opções são permitidas para introdução dos dados de inicialização do FRAPCON: uma via cartões e outra via fita magnética. Para o FRAP-T6, a única opção é através de fita magnética. Dois tipos de interligação foram desenvolvidas:

- 1) interligação FRAPCON-1/FRAP-T4;
- 2) interligação FRAPCON-2/FRAP-T6.

2.1. Interligação FRAPCON-1/FRAP-T4

Para interligar o FRAPCON-1 e o FRAP-T4 algumas modificações foram introduzidas nestes códigos, uma vez que as versões disponíveis no IPEN não eram compatíveis para interligação. No caso, a subrotina RESTFS encarregada de armazenar os resultados de saída do código FRAPCON-1 em fita magnética, para posterior inicialização do transiente, não era compatível com a subrotina RRTOD do FRAP-T4, encarregada de ler estes parâmetros. A lista de parâmetros exigidos pela RRTOD para inicializar o FRAP-T4 era maior do que a fornecida pela RESTFS do FRAPCON-1. Para que fosse possível a interligação via fita magnética foi necessário efetuar algumas modificações nos códigos. Os seguintes passos foram desenvolvidos:

- 1) Localizar no FRAPCON-1 a subrotina responsável pela impressão de seus resultados (subrotina PRINT2). Identificar nesta subrotina as variáveis que contem os parâmetros exigidos para a inicialização do FRAP-T4 e que não eram fornecidos pela subrotina RESTFS. Criar uma nova subrotina (TAPES) que reunisse as informações da PRINT2 e da RESTFS e as organizasse em um formato compatível com a subrotina de leitura RRTOD do FRAP-T4 e as armazenasse em fita magnética.

- 2) Modificar a subrotina RRTOD do FRAP-T4 para que dois parâmetros exigidos na inicialização pudessem ser fornecidos via cartão. Estes parâmetros são

DT (time step) e NTSTEP (número de time-steps) que devem ser escolhidos de acordo com o transiente analisado e não fornecidos pelo FRAPCON.

2.2. Interligação FRAPCON-2/FRAP-T6

O procedimento para interligação dos códigos FRAPCON-2/FRAP-T6 foi muito mais simples que o dos códigos FRAPCON-1 e FRAP-T4. No caso, a subrotina que armazena os resultados do FRAPCON-2 (RESTFS), idêntica àquela do FRAPCON-1, possui a maioria dos parâmetros exigidos pela subrotina de leitura dos dados de inicialização do FRAP-T6 (também, RESTFS). O FRAP-T6 exige para a inicialização muito menos parâmetros que o FRAP-T4. Para interligar os códigos FRAPCON-2 e FRAP-T6, o procedimento adotado foi o de modificar a subrotina RESTFS do FRAPCON-2, rearranjando-a na ordem de gravação dos parâmetros na forma exigida pelo FRAP-T6. Alguns parâmetros fornecidos pela RESTFS do FRAPCON-2 não eram requeridos pela RESTFS do FRAP-T6 e por este motivo foram excluídos da gravação.

2.3. Incompatibilidades na Interligação FRAPCON/FRAP-T

Desde que o FRAPCON fornece as condições iniciais para o FRAP-T, os principais modelos utilizados nos dois códigos deveriam ser rigorosamente iguais entre si. Quando o efeito da queima não é considerado (início da vida), o FRAP-T calcula as condições da vareta em regime permanente no instante zero do transiente. Se o mesmo cálculo fosse desenvolvido com o FRAPCON, as mesmas condições na vareta deveriam ser obtidas. Entretanto, os modelos térmicos nos dois códigos não são consistentes, levando a diferentes resultados para as mesmas condições iniciais e de fronteira utilizadas. A temperatura na superfície externa do revestimento calculada pelo FRAP-T é maior do que aquela calculada pelo FRAPCON. A razão para isto é que os modelos de transferência de calor em ebulição nucleada são diferentes em cada código, sendo o coeficiente de transferência de calor calculado pelo FRAPCON maior do que aquele calculado pelo FRAP-T. A temperatura na superfície do combustível calculada pelo FRAP-T é também maior do que aquela calculada pelo FRAPCON. Duas razões são apresentadas. Primeiro, a temperatura no revestimento no caso analisado pelo FRAP-T é maior do que aquela analisada pelo FRAPCON. Segundo, a condutância na folga pastilha-revestimento calculada pelo FRAP-T é menor do que aquela calculada pelo FRAPCON. Apesar disto, a temperatura central no combustível fornecida pelo FRAP-T é menor do que aquela fornecida pelo FRAPCON. Isto ocorre porque os códigos usam diferentes parâmetros para modificação da condutividade térmica do combustível, devido as rachaduras formadas.

Quando a queima é considerada e as condições iniciais do transiente são fornecidas pelo FRAPCON em diferentes etapas de queima, o FRAP-T recalcula as condições da vareta no instante zero do transiente, à partir dos dados de inicialização fornecidos. Como os modelos térmicos (e, também, os modelos mecânicos) nos dois códigos não são rigorosamente iguais entre si, as condições da vareta no início do transiente e calculadas pelo FRAP-T não são as mesmas fornecidas pelo FRAPCON.

3. Interligação RELAP-4/FRAP-T

Uma opção de entrada do FRAP-T permite que as condições termo-hidráulicas fornecidas pelo RELAP-4 durante o transiente sejam lidas diretamente de fitas magnéticas. Um programa computacional simples foi desenvolvido para converter a saída do RELAP-4 na forma a ser utilizada como dado de entrada pelo FRAP-T. Dependendo da opção selecionada, dois tipos de conjunto de dados termo-hidráulicos distintos podem ser fornecidos ao FRAP-T:

Opção 1 - histórico da pressão, da entalpia, da temperatura e da vazão no "plenum" superior e inferior e em cada zona axial previamente definida na vareta;

Opção 2 - histórico do coeficiente de transferência de calor, da pressão e da temperatura do refrigerante em cada zona axial previamente definida na vareta.

O programa de acoplamento gera três unidades de saída que contêm respectivamente:

- (1) - os dados de entrada necessários e na ordem correta para a primeira opção do código FRAP-T;
- (2) - os dados de entrada necessários e na ordem correta para a segunda opção do código FRAP-T;
- (3) - o histórico da potência média no núcleo durante o transiente.

4. Análise de um APRPGR sem Inicialização e com Inicialização dos Dados de Entrada do FRAP-T

O comportamento de uma vareta combustível típica de um PWR na fase de despressurização após um APRPGR na perna fria do circuito primário foi analisado para dois casos com o FRAP-T6. No primeiro, o efeito da queima não foi considerado e o próprio FRAP-T6 gerou as condições em regime permanente na vareta no instante zero do transiente. No segundo, a queima foi considerada e os dados de inicialização foram fornecidos pelo FRAPCON-2. Neste caso, o início do transiente ocorreu após 365 dias de operação normal do reator, a uma potência média constante de 18,1 KW/m. Uma distribuição axial cossenoidal de potência foi admitida nos cálculos. A queima máxima ocorreu na posição axial central da vareta, atingindo 21774 MWD/MTU. A tabela 1 apresenta os dados de projeto da vareta analisada.

As condições termo-hidráulicas durante o acidente foram fornecidas pelo RELAP-4 (MOD 3) via fita magnética através da interligação desenvolvida com o FRAP-T6. Os dados da opção 1 foram utilizados nos dois casos analisados. O histórico de potência e da pressão do refrigerante durante o acidente são apresentados nas figuras 1 e 2. A fase de despressurização ocorreu em 20 s e uma distribuição axial cossenoidal de potência foi utilizada durante a análise do acidente.

Os principais parâmetros resultantes da análise da vareta combustível com o FRAP-T6, com e sem inicialização, são apresentados nas figuras de 3 a 8 e incluem o histórico das temperaturas central e superficial do combustível, da temperatura na superfície externa do revestimento da vareta, da pressão interna

Tabela 1: Especificação de Projeto da Vareta Combustível

Diâmetro da pastilha UO_2 (mm)	8,192
Diâmetro interno do revestimento (mm)	8,357
Diâmetro externo do revestimento (mm)	9,500
Densidade do combustível (% da densidade teórica)	95,0
Enriquecimento (% em peso U-235)	2,6
Comprimento da coluna de pastilha (mm)	3657,6
Pressão interna do gás (MPa)	3,103 (He)
Pressão do refrigerante (MPa)	15,494
Temperatura de entrada do refrigerante ($^{\circ}C$)	287,5

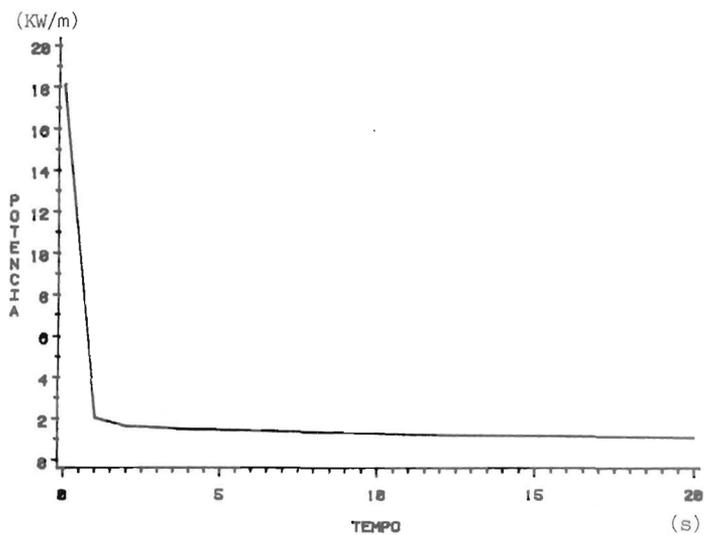


Figura 1: Histórico da potência média no núcleo

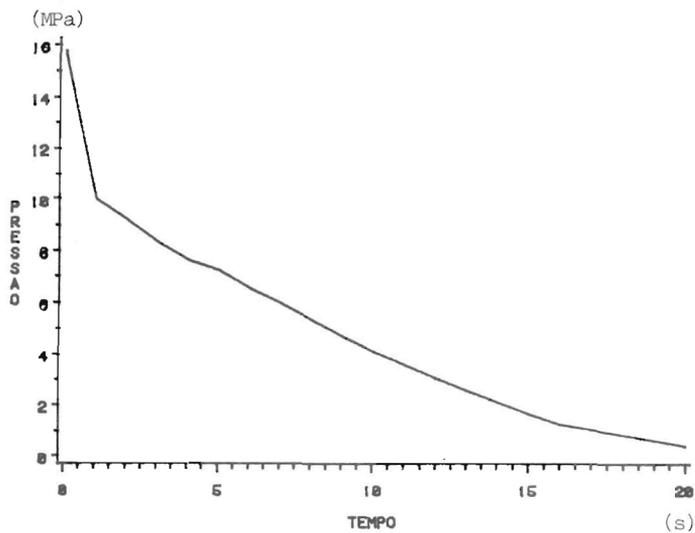


Figura 2: Histórico da pressão no refrigerante

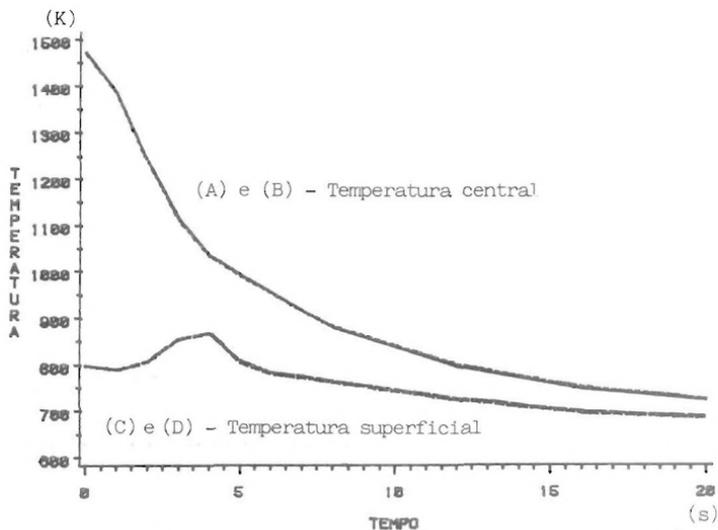
na vareta, do coeficiente de transferência de calor na folga pastilha-revestimento e da largura da folga térmica entre pastilha e revestimento. Todos os dados são para a posição axial de pico de potência.

Uma comparação entre os casos analisados mostra que a pressão interna na vareta (Fig. 5), fornecido pelo FRAPCON-2, é maior do que aquela calculada pelo FRAP-T6 nas condições iniciais do transiente sem inicialização. A razão para a maior pressão reside no menor volume livre para gases na vareta obtido no caso inicializado, já que a liberação de gases de fissão foi mínima em regime permanente e as temperaturas na folga pastilha-revestimento, obtidas nos casos analisados, são praticamente iguais. O volume livre total para gases na vareta consiste na soma dos volumes do "plenum", da folga pastilha-revestimento, das rachaduras no combustível, da concavidade na pastilha combustível e da porosidade aberta no combustível. Apesar da largura da folga térmica entre pastilha e revestimento (e, conseqüentemente, seu volume) tornar-se maior no caso com inicialização 3,5 s após o início do transiente (Fig. 8), o volume livre total para gases, neste caso, permanece sempre menor do que aquele obtido no caso não inicializado, mantendo, assim, uma maior pressão durante o transiente. Uma largura menor da folga pastilha-revestimento é, também, a razão para o maior coeficiente de transferência de calor na folga (Fig. 7), obtido no caso não inicializado, até 3,5 s após o início do transiente. A partir deste instante a situação se inverte. Apesar dos coeficientes de transferência de calor serem ligeiramente diferentes em cada caso, as temperaturas na vareta são praticamente iguais. Valores um pouco maiores foram obtidos para as temperaturas no caso não inicializado até 5 s após o início da depressurização. Para tempos superiores a este, a situação se inverte.

Apesar de que os valores da largura da folga pastilha-revestimento são próximos no início do transiente, os deslocamentos na pastilha e no revestimento são totalmente diferentes nos dois casos analisados. Os deslocamentos no revestimento para o caso inicializado são negativos (máximo de $7,1E-03$ mm), mostrando os efeitos da fluência (creep) no revestimento de zircaloy. Para o caso não inicializado, os deslocamentos no revestimento são positivos (máximo de $1,57E-03$ mm), mostrando que o efeito da expansão térmica é preponderante sobre a diferença de pressão na parede do revestimento. O combustível, por sua vez, apresenta um deslocamento radial menor (máximo de $1,91E-02$ mm), quando comparado ao deslocamento radial (máximo de $2,99E-02$ mm) no caso não inicializado. Entretanto, na composição destes valores, os tamanhos da folga nos dois casos se aproximam.

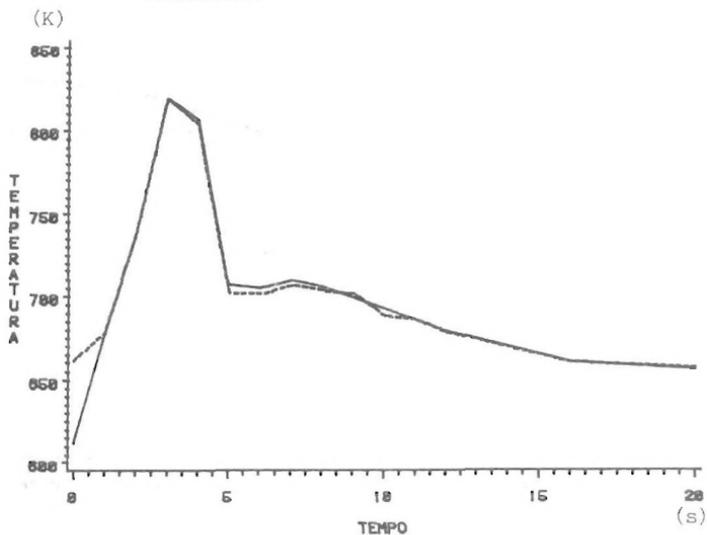
Durante a fase de depressurização não ocorreu o contato pastilha-revestimento e as tensões calculadas no revestimento foram principalmente devido à diferença de pressão externa e interna. Quando a pressão do refrigerante (Fig. 2) atinge valores abaixo da pressão interna na vareta (Fig. 5), o revestimento é tracionado. Como a diferença de pressão é praticamente igual nos dois casos analisados, os valores de tensão circunferencial no revestimento são semelhantes (Fig. 6).

Os resultados acima mostram que a inicialização dos dados para a análise do acidente com o FRAPCON é importante, desde que ele comanda o desempenho da vareta de uma forma diferente daquela desenvolvida pelo FRAP-T sem inicialização.



(A) e (C) - sem inicialização (B) e (D) - com inicialização

Figura 3: Histórico das temperaturas central e superficial do combustível



— sem inicializ. - - - com inicializ.

Figura 4: Histórico da temperatura na superfície externa do revestimento da vareta

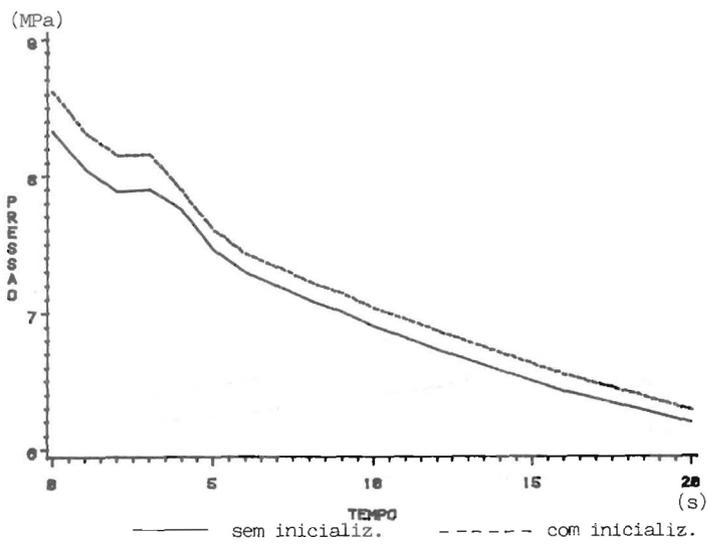


Figura 5: Histórico da pressão interna na vareta

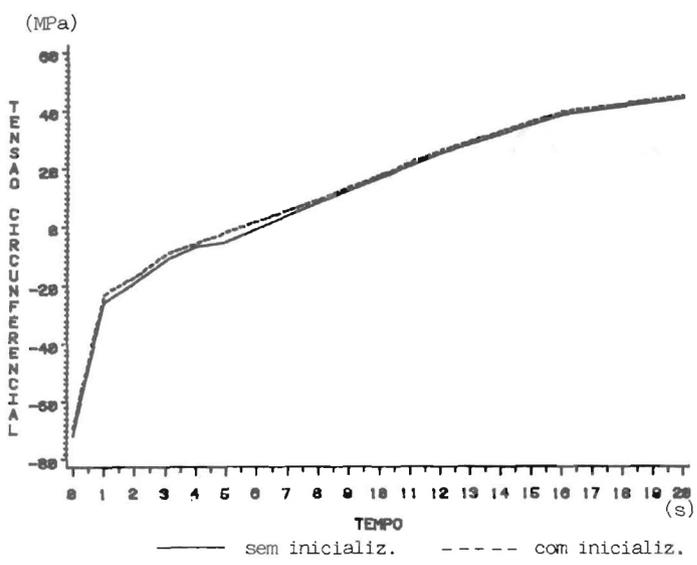


Figura 6: Histórico da tensão circunferencial no revestimento da vareta

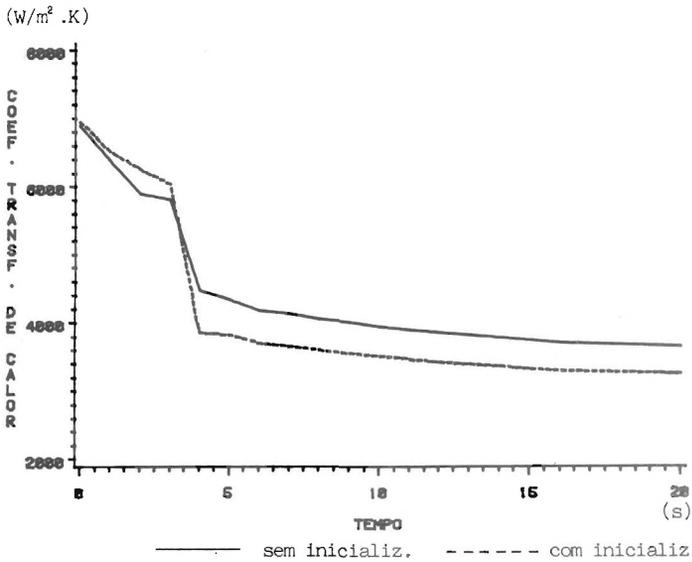


Figura 7: Histórico do coeficiente de transferência de calor na folga pastilha-revestimento

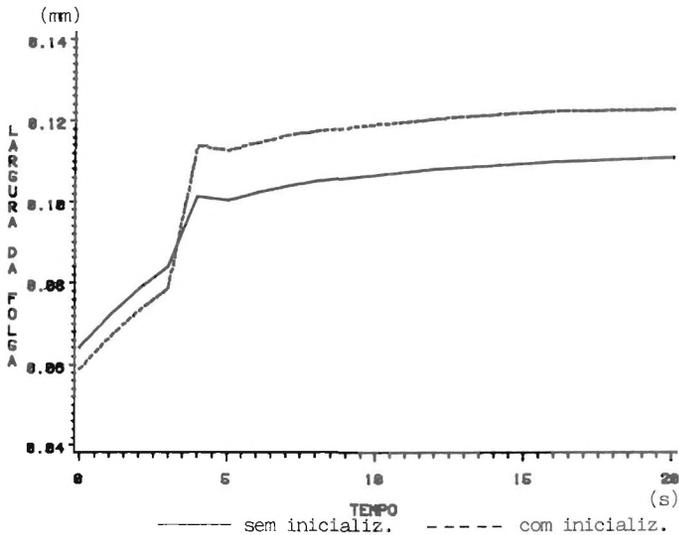


Figura 8: Histórico da largura da folga térmica entre pastilha e revestimento

5. Conclusões

A interligação via fita magnética dos códigos FRAP-T, FRAPCON e RELAP-4 permite agilizar a análise do comportamento de uma vareta combustível em regimes de transientes e acidentes hipotéticos nos reatores de água leve. Algumas melhorias devem ser desenvolvidas de forma a combinar os mesmos modelos de cálculo nos códigos FRAPCON e FRAP-T. Uma validação posterior do código FRAP-T deve ser desenvolvida para verificar seus modelos de cálculo.

Referências

- [1] L. J. Siefken et al, "FRAP-T4: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods", CDAP-TR-78-027 (1978).
- [2] L. J. Siefken et al, "FRAP-T6: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods", NUREG/CR-2148 (1981).
- [3] "RELAP-4 (MOD 3) : "A Computer Program for the Transient Thermal Hydraulic Analysis ", Aerojet Nuclear Company, ANCR-1127-UC-32 (1973).
- [4] G. A. Berna et al, "FRAPCON-1: A Computer Code for the Steady State Analysis of Oxide Fuel Rods", CDAP-TR-78-032-R1 (1978).
- [5] G. A. Berna et al, "FRAPCON-2: A Computer Code for the Calculation of Steady State Thermal Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods", NUREG/CR-1845 (1981).
- [6] "Qualificação de Programas de Cálculo para a Análise de Acidentes de Perda de Refrigerante em Reatores a Água Pressurizada", CNEN-NE-1.19 (1985).