

NUCLEBRÁS

Empresas Nucleares Brasileiras SA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VARETAS
COMBUSTÍVEIS-TESTE SOB IRRADIAÇÃO**

F. S. Lameiras et al.

NUCLEBRÁS/CDTN - 434/81

Abril 1981

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

CAIXA POSTAL, 1941 - 30.000 - BELO HORIZONTE - BRASIL

**EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S.A. – NUCLEBRÁS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE REATORES**

**AValiação DO COMPORTAMENTO DE VARETAS
COMBUSTÍVEIS—TESTE SOB IRRADIAÇÃO**

**Fernando Soares Lameiras
José Lúcio Terra
Lúcio Carlos Martins Pinto
Márcio Soares Dias
Ricardo Brant Pinheiro**

**Trabalho (convidado) apresentado no
II Encontro Nacional de Física de Reatores,
realizado no Centrecon, Itaipava, RJ,
12–15 de abril 1981**

**NUCLEBRÁS/CDTN–434/81
Belo Horizonte – Brasil
Abril 1981**

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VARETAS COMBUSTÍVEIS-TESTE SOB IRRADIAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A modelação analítica do comportamento de varetas combustíveis é de grande importância para o projeto e previsão de desempenho em operação de varetas combustíveis dos reatores de potência. Através do acompanhamento da irradiação de varetas combustíveis-teste instrumentadas, simulando as condições operacionais nos reatores, acrescentado dos resultados dos exames de pós-irradiação, testa-se, avalia-se e calibra-se essas modelações analíticas.

Quatro varetas brasileiras, irradiadas no Centro de Pesquisas Nucleares-KFA de Jülich, RFA, estão sendo utilizadas no teste, verificação e calibração de três códigos de cálculo disponíveis no CDTN para projeto e previsão de comportamento de varetas combustíveis. A seguir são discutidos resultados (alguns ainda preliminares) destes testes.

2. IRRADIAÇÃO DAS VARETAS COMBUSTÍVEIS-TESTE

A Tabela 1 apresenta dados e características gerais das duas séries de irradiações até agora realizadas no escopo de um programa conjunto NUCLEBRÁS/KFA [1] no reator de testes FRJ-2 (DIDO) do KFA, Jülich.

O objetivo específico da 1ª série de irradiações foi verificar a influência de diferentes folgas diametrais de enchimento, enquanto que o da 2ª série foi verificar a influência de diferentes geometrias e densidades de pastilha no comportamento das varetas combustíveis em condições de operação simuladas.

As Figuras 1 e 2 apresentam descrições e dados de projeto das varetas da 1ª série (denominadas DT50 e DT51) e da 2ª série (denominadas DT54 e DT55), respectivamente. Todas as varetas foram instrumentadas com transdutor de pressão, para acompanhar a evolução da pressão interna. A Figura 3 apresenta esquematicamente a cápsula usada para a irradiação destas varetas e que simula as condições de operação em PWR.

Os exames de pós-irradiação da 1ª série de irradiações já foram realizados, enquanto que os da 2ª série deverão ser realizados no decorrer de 1981/82. Nestas irradiações atingiu-se queimas máximas de 3.286 MWD/ton U e 12.744 MWD/ton U, respectivamente.

3. RESULTADOS DOS EXAMES DE PÓS-IRRADIAÇÃO DA 1ª SÉRIE DE IRRADIAÇÕES

Os resultados dos exames de pós-irradiação (P.I.E.) são resumidos abaixo:

- As gamagrafias deixaram reconhecer um encurtamento da coluna combustível de:

0,94% na vareta DT50;

0,32% na vareta DT51;

este encurtamento é o resultado da superposição dos efeitos de densificação e inchamento do combustível.

- As medições dos comprimentos dos revestimentos revelaram um alongamento de:

0,008% na vareta DT50,

0,006% na vareta DT51;

este alongamento é superior àquele esperado causado por crescimento do tubo de zircaloy (0,005%), revelando que o tubo de revestimento foi leve e axialmente forçado e deformado pela coluna de pastilhas combustíveis, pelo fechamento da folga de enchimento axial (plenum) original de 2mm.

- Não foram encontrados vestígios de interação combustível-revestimento causado pelo fechamento da folga diametral de enchimento.
- As medições dos diâmetros das quatro varetas mostraram uma redução entre 15 e 20µm.

A Figura 4 apresenta fotografias das duas varetas DT50 e DT51 após a irradiação. Nota-se uma carepa tipo fuligem que se precipitou nas superfícies.

A Figura 5 mostra um corte transversal da vareta DT51. Nela nota-se as fissuras da pastilha e a formação do canal central. A Figura 6 apresenta ampliações da faixa A da Figura 5. O canal central (veja Figura 7, corte longitudinal) forma-se a través da migração de poros para o centro da pastilha (induzida pelo gradiente de temperatura), resultando na formação dos chamados grãos colunares (ampliações de números 4 e 5 da Figura 6). A região imediatamente externa aos grãos colunares (ampliação de número 3) é caracterizada pelo acúmulo de bolhas de gases de fissão nos contornos de grão. Nota-se que já há interconexão de bolhas, que é um mecanismo de liberação de gases de fissão conhecido como "break-away". Observa-se que houve a crêscimo de grão em relação às regiões mais frias - regiões mais externas da pastilha - (ampliações de números 1 e 2), porém o crescimento foi equiaxial.

4. CÁLCULO DO DESEMPENHO USANDO MODELOS ANALÍTICOS

4.1 Código CARO

O código CARO, desenvolvido pela Kraftwerk Union AG, vem sendo utilizado no CDTN no âmbito de um estudo conjunto NUCLEBRÁS/KFA/KWU/NUKEM de viabilidade da utilização de tório em PWR. Sua aplicação na avaliação de desempenho das varetas-teste das duas séries de irradiação vem sendo feita como exercício para sua aplicação na previsão do comportamento de varetas de óxido misto $(Th,U)O_2$ e $(Th,Pu)O_2$.

4.1.1 Varetas DT50 e DT51

Foram considerados, através de modelos analíticos, diversos fenômenos que influem no comportamento da vareta combustível, sendo estes indicados na Tabela 2, que apresenta também os respectivos parâmetros usados no cálculo.

As Figuras 8 e 9 apresentam a comparação da evolução da pressão interna medida e calculada com o programa CARO para as varetas DT50 e DT51 respectivamente. Os valores calculados acompanharam qualitativamente bem os valores medidos (vareta DT51). As discrepâncias se explicam através de uma incerteza na determinação do volume interno livre, uma vez que não se dispunha - na época da fabricação destas varetas - de dispositivo para a determinação deste volume. Os valores do volume interno livre usados no cálculo foram apenas estimados.

4.1.2 Varetas DT54 e DT55

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de entrada dos modelos analíticos usados no cálculo. As Figuras 10 e 11 apresentam uma comparação da evolução da pressão interna medida e calculada. Obteve-se boa concordância com os valores medidos. Até 57,5 dias de irradiação os valores calculados estiveram superiores aos valores medidos. No instante da rampa do 57º dia considerou-se nos cálculos que, em virtude das fissuras forma-

das no combustível, 19% do gás de fissão acumulado nos contornos de grão foi liberado. Para a rampa do 126º dia, considerou-se que 8% do gás de fissão acumulado nos contornos de grão foi liberado.

4.2 Programa PIG-1

O programa PIG-1, em desenvolvimento no CDTN desde setembro/80, tem por objetivo inicial calcular a evolução da pressão interna gasosa em varetas-teste e através de modelos analíticos estimar as variações microestruturais que possam ser comparadas com resultados de exames de pós-irradiação.

Os fenômenos considerados no programa, bem como os parâmetros usados nos cálculos estão resumidos também na Tabela 2.

4.2.1 Varetas DT50 e DT51

Os valores calculados para a pressão interna destas varetas em diversos pontos da irradiação acompanharam de modo satisfatório os valores medidos, como mostrado nas Figuras 8 e 9.

4.2.2 Varetas DT54 e DT55

Os resultados obtidos com PIG-1 para as varetas DT54 e DT55 estão mostrados nas Figuras 10 e 11 .

Os modelos de liberação de gás de fissão desenvolvidos para condições de estado estacionário e adaptados para condições cíclicas de potência são, em geral, altamente dependentes do perfil calculado da temperatura do combustível.

Na Figura 11 pode-se observar que os resultados obtidos para a vareta DT55 foram bons até o 125º dia da irradiação e, a partir daí observa-se um aumento relativamente grande da pressão calculada. Os resultados para a DT54 apresentaram valores de pressão subestimados no período compreendido em

tre o 839 ao 1259 dia, devido à maior sensibilidade do modelo à variação do perfil de temperatura em função da potência.

4.3 Código GAPCON-3 [4]

4.3.1 Varetas DT50 e DT51

Do ponto de vista qualitativo o código acompanha bem o desempenho da vareta DT51, conforme pode ser visto pela Figura 9. Entretanto o mesmo não acontece quanto à vareta DT50, Figura 8.

Conforme já dissemos anteriormente estas discrepâncias podem estar relacionadas com os volumes internos livres de ambas varetas. Por outro lado é necessário rever-se o modelo de liberação de gás de fissão usado no código, quando do cálculo de transientes, bem como o modelo de inchamento.

4.3.2 Varetas DT54 e DT55

O acompanhamento da vareta DT54 foi bom somente até o 759 dia de irradiação quando então os valores calculados passam a ser bem inferiores àqueles medidos (Figura 10). Quanto à vareta DT55 o código apresenta boa previsão conforme pode ser visto pela Figura 11.

A discrepância apresentada para a vareta DT54 sugere um estudo mais detalhado do modelo de liberação de gás de fissão quando do cálculo de rampas de potência.

Nos cálculos das quatro varetas conservou-se os mesmos modelos e parâmetros, conforme Tabela 2.

5. CONCLUSÃO

As irradiações e os exames de pós-irradiação até agora realizados revelaram um bom comportamento das varetas combustíveis-teste em condições de operação em PWR, não tendo sido

observado dano algum que pudesse ser atribuído ao processo de fabricação das mesmas.

Os dados de entrada necessários para o cálculo do comportamento das varetas DT50 e DT51 são menos confiáveis, uma vez que não foram realizadas algumas determinações importantes, como volume interno livre e porosidade aberta. Estes dados foram apenas estimados e usados no cálculo sendo, certamente, uma das causas das discrepâncias observadas entre valores calculados e medidos. Para estas varetas obteve-se os melhores resultados com o código PIG-1, enquanto que os códigos CARO e GAPCON-3 forneceram resultados semelhantes.

A mais completa determinação de parâmetros de fabricação importantes para o cálculo do desempenho fazem os resultados obtidos para as varetas DT54 e DT55 mais confiáveis. Obteve-se os melhores resultados com o código CARO, no qual se introduziu tratamento apropriado à consideração do efeito das rampas de potência. O código PIG-1 forneceu resultado razoável, revelando que lhe falta um tratamento mais adequado à consideração das rampas. Tendo em vista os resultados obtidos com o código GAPCON-3, conclui-se que o mesmo carece de um tratamento mais adequado às rampas de potência e que seu modo de liberação de gás de fissão deve ser revisto.

6. REFERÊNCIAS

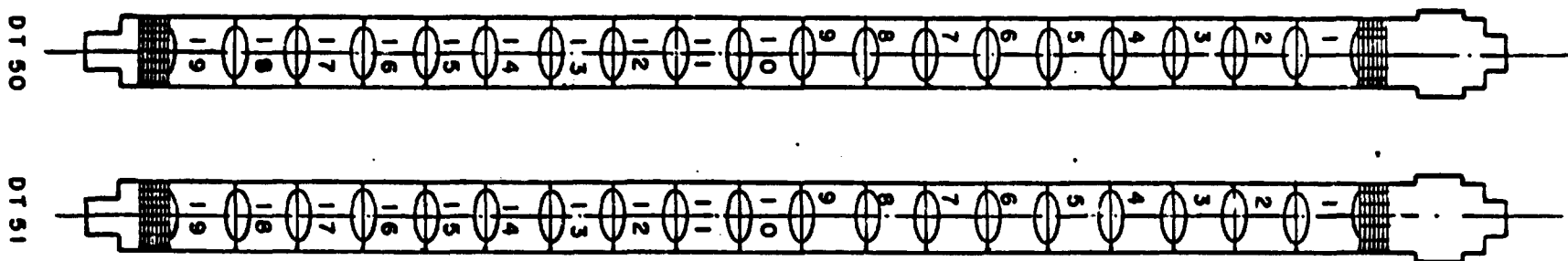
- [1] DIAS, J.W.; KRANCZYNSKI, S.; SCHARMER, K. Bilateral cooperation between Germany and Brazil on fuel irradiation. In: International Conference on Nuclear Power and its Fuel Cycle, Salzburg, Maio 1977 (IAEA-CN-36/85)
- [2] HERING, W. Ein neues Spaltgas-Freisetzungsmodell auf physikalischer Basis. In: Reaktortagung 1977, 473-476, Mannheim, 1977
- [3] WORDSWORTH, J. IAMBUS - A digital computer code for the design, in-pile performance prediction and post-irradiation analysis of arbitrary fuel rods. Nuclear Engineering and Design, 31 (3): 309-366 (1974)
- [4] LANNING, D.D. et alii. GAPCON-THERMAL-3 code description. Battelle Pacific Northwest Laboratories. Richland, Jan. 1978 (PNL-2434)

TABELA 1 - DADOS E CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS IRRADIAÇÕES

VARETA-TESTE	1ª SÉRIE		2ª SÉRIE	
	DT50	DT51	DT54	DT55
OBJETIVO ESPECÍFICO	EFEITO DE DIFERENTES FOLGAS DIAMETRAIS		EFEITO DE DIFERENTES GEOMETRIAS E DENSIDADES DE PASTILHA	
COMBUSTÍVEL	UO ₂ ENRIQUECIDO A 3,2% U235			
INSTRUMENTAÇÃO	TRANSDUTOR DE PRESSÃO			
INÍCIO/FIM DA IRRADIAÇÃO	30.04.76 / 31.05.76		03.10.79 / 27.06.80	
INÍCIO/FIM DOS E.P.I.	AGOSTO 76 / MAIO 77		PROGRAMADOS PARA 1981/ 1982	
QUEIMA MÁXIMA, MW _D /TON U	3.203	3.286	12.524	12.744
POTÊNCIA MÁXIMA, W/CM	668	671	521	524

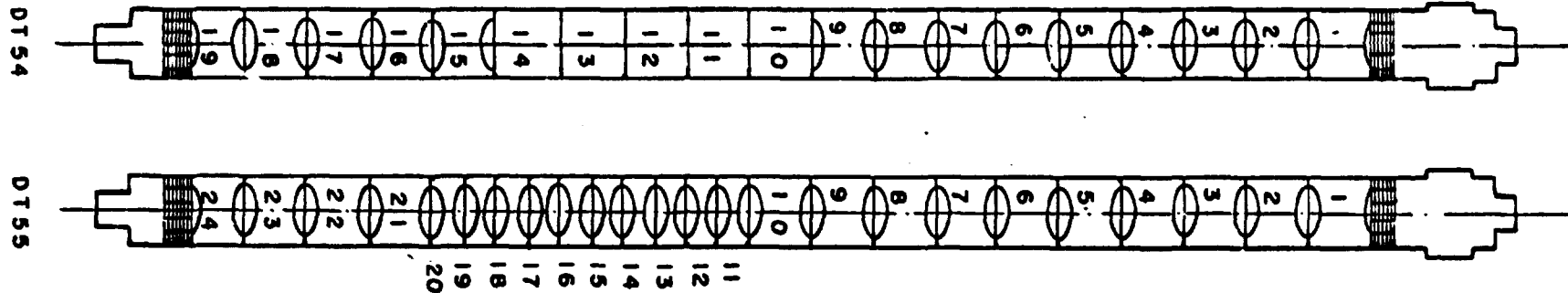
TABELA 2 - PARÂMETROS DE ENTRADA PARA OS MODELOS ANALÍTICOS

	CAPO	SAPCON	PIG
RELOCAÇÃO	40% DE FECHAMENTO DA FOLGA DIAFETRAL DE ENCHIMENTO PARA AS VARETAS DT50 E DT51, 50% PARA DT5A E DT5S	30% DE FECHAMENTO DA FOLGA RADIAL	40% DE FECHAMENTO DA FOLGA DIAFETRAL HORIZONTAL
DENSIFICAÇÃO	<p>MODELO ASSPASH-STENLE</p> $\frac{\Delta Y}{V} = \frac{\Delta P_D (1 - (1 - \frac{\Delta}{A})^3)}{A_D}$ <p>$\Delta P_D = 3 \times A_D = 18,2 \text{ MPa/ton}$ PARA DT50 E DT51</p> <p>$\Delta P_D = 2,5 \times A_D = 11,8 \text{ MPa/ton}$ PARA DT5A E DT5S</p>	<p>MODELO DE P.O. MEYER</p> $\frac{\Delta R}{R} = R \cdot \ln(10) \cdot B \cdot \frac{DES}{6\rho}$ <p>0 - OXETINA (PMB/TON) DES - DIÂMETRO DA PASTILHA (POLEGADA) ρ - DENSIDADE R e B - CONSTANTES</p>	<p>MODELO ASSPASH-STENLE</p> $\frac{\Delta Y}{V} = \frac{\Delta P_D (1 - (1 - \frac{\Delta}{A})^3)}{A_D}$ <p>$\Delta P_D = 3 \times A_D = 18,2 \text{ MPa/KgU}$</p>
INCHAMENTO	<p>$\frac{\Delta Y}{V} = 0,40 (10^{20} \text{ FISSÕES/CM}^3)$</p> <p>COM 15% DE INCHAMENTO NA MATRIZ COMBUSTÍVEL PARA DENTRO DOS POROS</p>	<p>MODELO DE GEITNOFF</p> $\frac{\Delta Y}{V} = \frac{F \cdot V_F \cdot F + R_C \cdot V_2 \cdot R}{10.000}$ <p>F - DENSIDADE FRACTURARIA R_F - TAXA DE INCHAMENTO V_F - VOLUME COMBUSTÍVEL POR UNIDADE DE COMPRIMENTO R_C - INCHAMENTO ADICIONAL V_C - VOLUME DO COMBUSTÍVEL POR UNIDADE DE COMPRIMENTO ENTRE 1300°C A 1700°C</p>	<p>GASOSO - LEI (FT)^{3/2}</p> $\frac{\Delta Y}{V} = \text{CONSTANTE} \times (FT)^{3/2}$ <p>SÓLIDO</p> $\frac{\Delta Y}{V} = \text{CONSTANTE} \times F$ <p>F - DENSIDADE DE FISSÃO T - TEMPERATURA</p>
REESTRUTURAÇÃO	<p>TEMPERATURA PARA A FORMAÇÃO DOS GRÃOS COLONIARES: 1750°C, MÁXIMA POROSIDADE DOS GRÃOS COLONIARES: 3%</p>	<p>TEMPERATURA PARA FORMAÇÃO DE GRÃOS COLONIARES: 1700°C, MÁXIMA POROSIDADE DOS GRÃOS COLONIARES: 2%</p>	<p>TEMPERATURA PARA A FORMAÇÃO DOS GRÃOS COLONIARES: T ≥ 1700°C</p> <p>TEMPERATURA PARA CRESCIMENTO DOS GRÃOS EQUITAXIAIS: 1550°C ≤ T < 1700°C</p>
LIBERAÇÃO DE GÁS DE FISSÃO	<p>MODELO HERING [2], COM FATOR DE AJUSTE DE 35/DIA</p>	<p>MODELO PRÓPRIO DO CÓDIGO O QUAL CONSIDERA 3 REGIÕES DE TEMPERATURA [4]</p>	<p>MODELO DEPENDENTE DA TEMPERATURA (3 REGIÕES) E QUEIFA, DESENVOLVIDO PARA CONDIÇÕES DE ESTACIONÁRIO E ADAPTADO PARA CONDIÇÕES CÍCLICAS DE POTÊNCIA POR J. WORDSWORTH [3]</p>



	Pastilha nº	Diâmetro mm	Altura mm	Densidade g/cm ³	"Dish" dxh mm x mm	Vol. médio "dish" mm ³	Observações
DT54	1 - 19	9,30	15,32	10,4	6,87x0,42	2x7,77	com "dish"
DT55	1 - 19	9,23	15,32	10,4	6,87x0,42	2x7,77	com "dish"

FIGURA I
 ESQUEMA DAS VARETAS - TESTE E DADOS DE PROJETO DA 1ª SÉRIE DE IRRADIAÇÕES



	Pastilha nº	Diâmetro mm	Altura mm	Densidade g/cm ³	"Dish" ϕ xh mm	Vol. médio "dish" mm ³	Observações
DT54	1 - 9	9,39	15,05	10,2	6,87x0,42	2x7,77	com "dish"
DT54	10 - 14	9,39	14,96	10,2	-	-	sem "dish"
DT54	15 - 19	9,39	15,05	10,2	6,87x0,42	2x7,77	com "dish"
DT55	1 - 5	9,39	11,22	10,2	6,91x0,42	2x8,02	com "dish" e chanfro
DT55	2 - 5	9,39	15,14	10,2			com "dish"
DT55	6 - 10	9,39	15,14	10,2			com "dish"
DT55	11 - 20	9,39	7,68	10,1			com "dish"
DT55	21 - 24	9,39	15,41	9,99			com "dish"

FIGURA 2

ESQUEMA DAS VARETAS - TESTE E DADOS DE PROJETO DA 2ª SÉRIE DE IRRADIAÇÕES

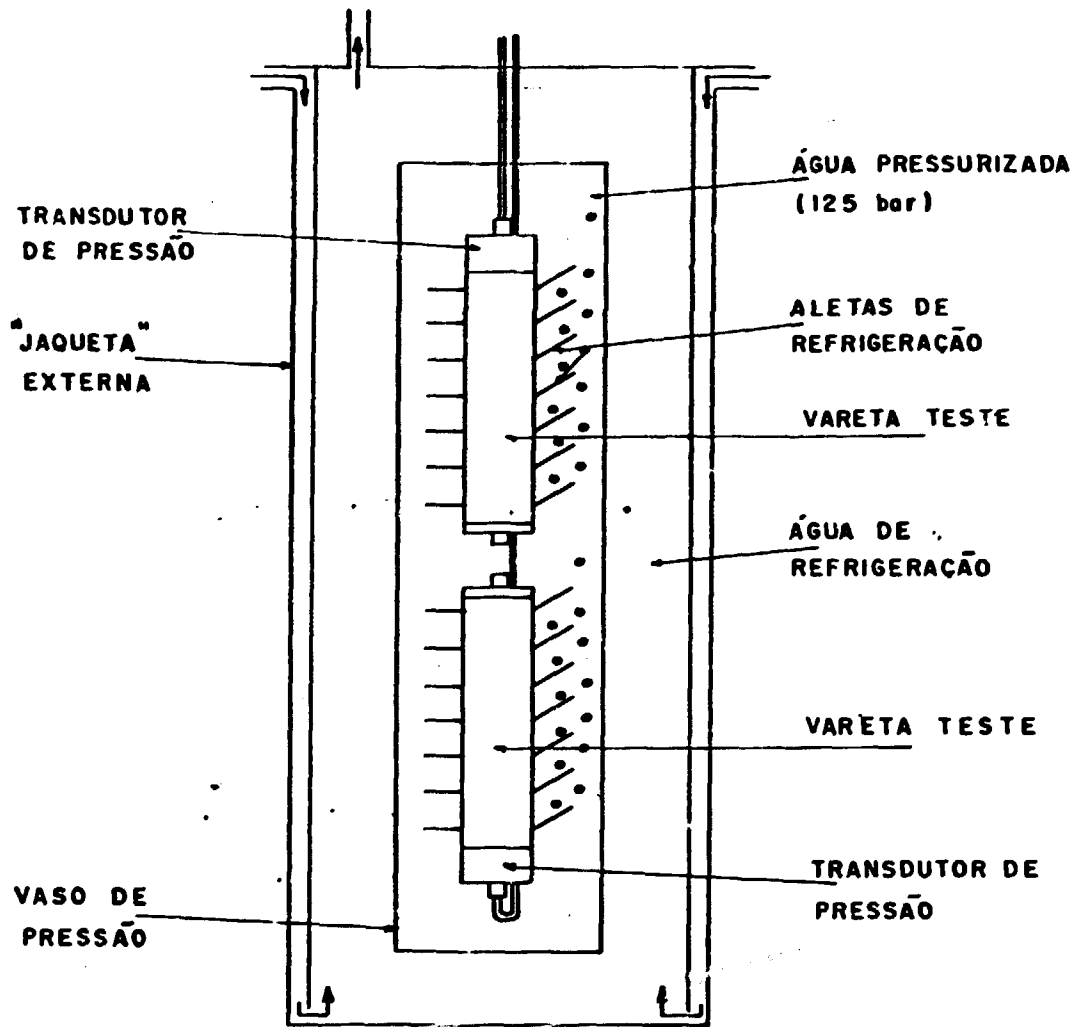
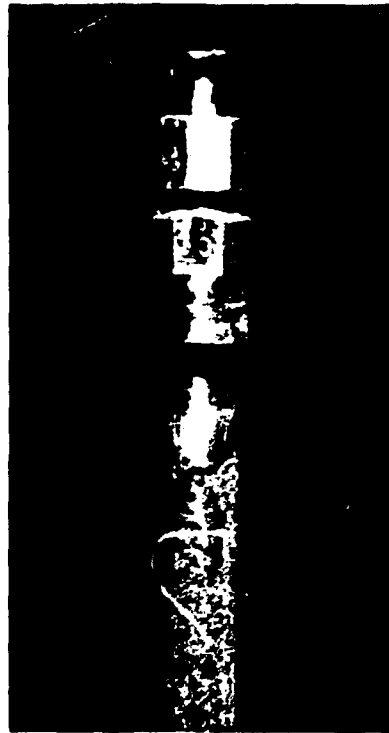
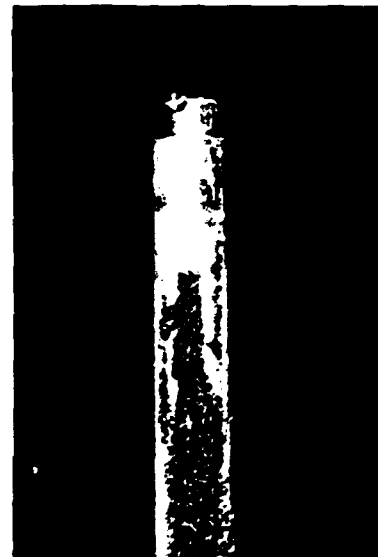
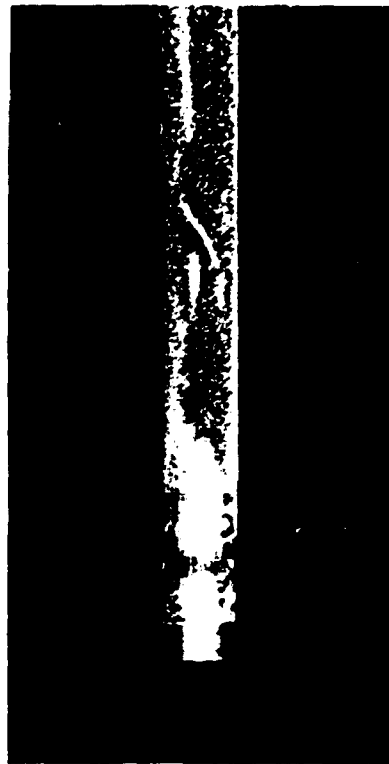


FIGURA 3
ESQUEMA DA CÁPSULA DE IRRADIAÇÃO
USADA PARA A IRRADIAÇÃO DAS VARETAS
E QUE SIMULA CONDIÇÕES PWR.



Vareta DT50



Vareta DT51

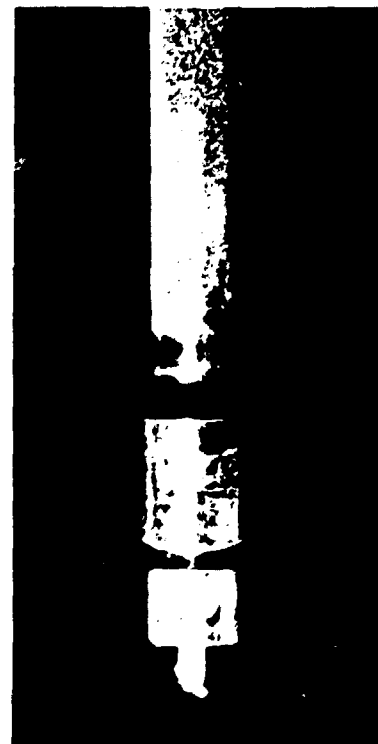


FIGURA 4
ASPECTOS DAS VARETAS-TESTE DT50 E
DT51 APÓS A IRRADIAÇÃO

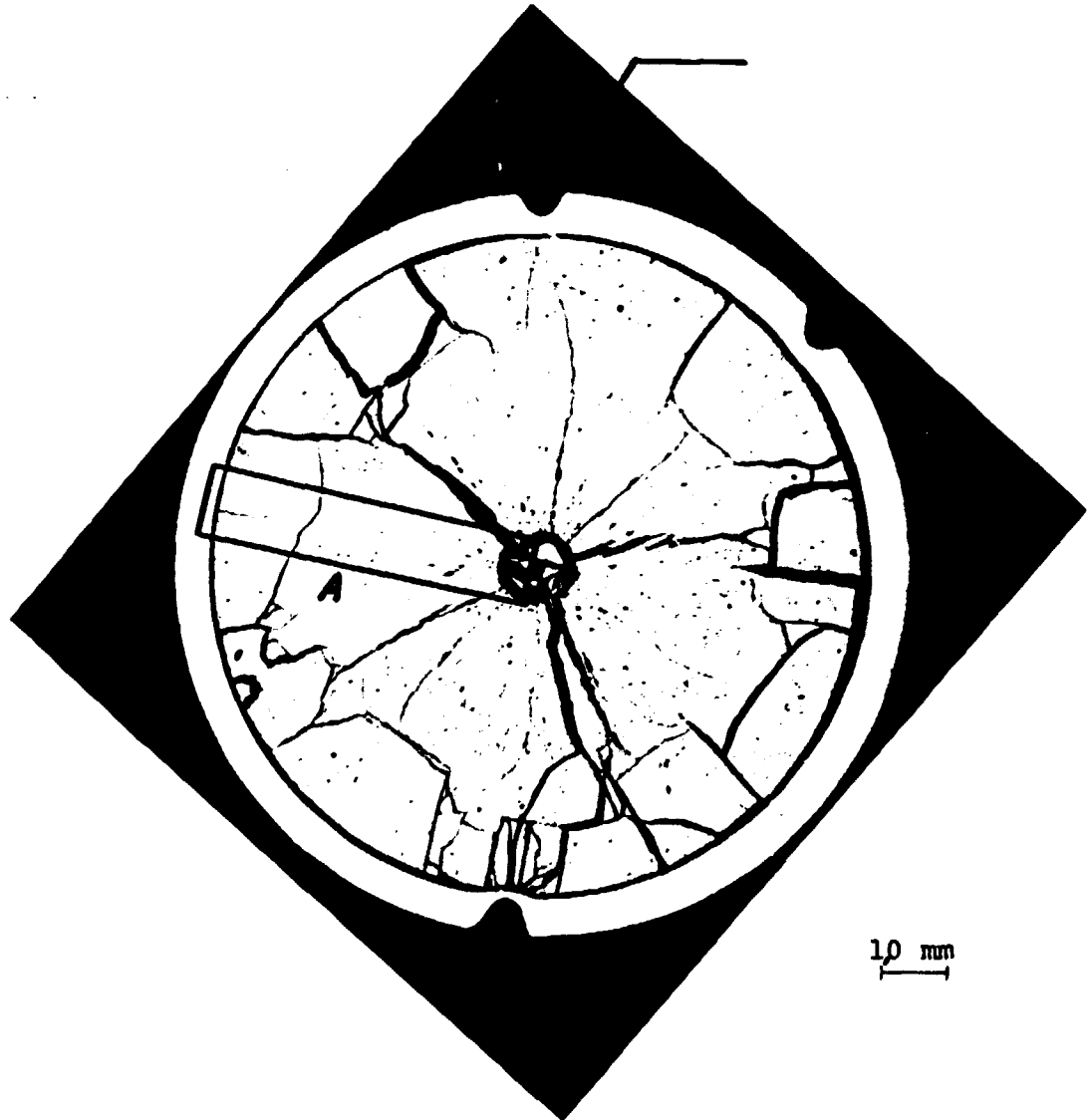


FIGURA 5
CORTE TRANSVERSAL DA
VARETA-TESTE DT51

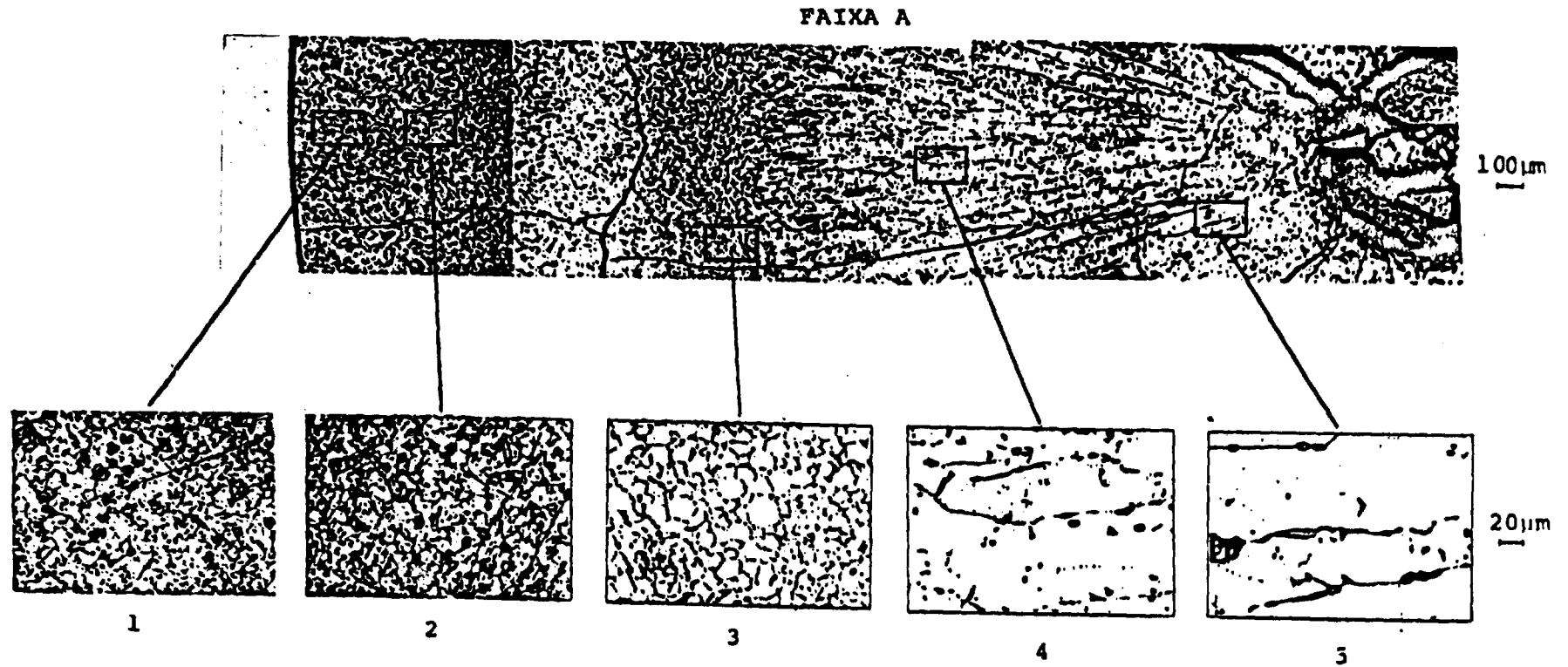


FIGURA 6
AMPLIAÇÕES DA FAIXA A DA FIGURA 5

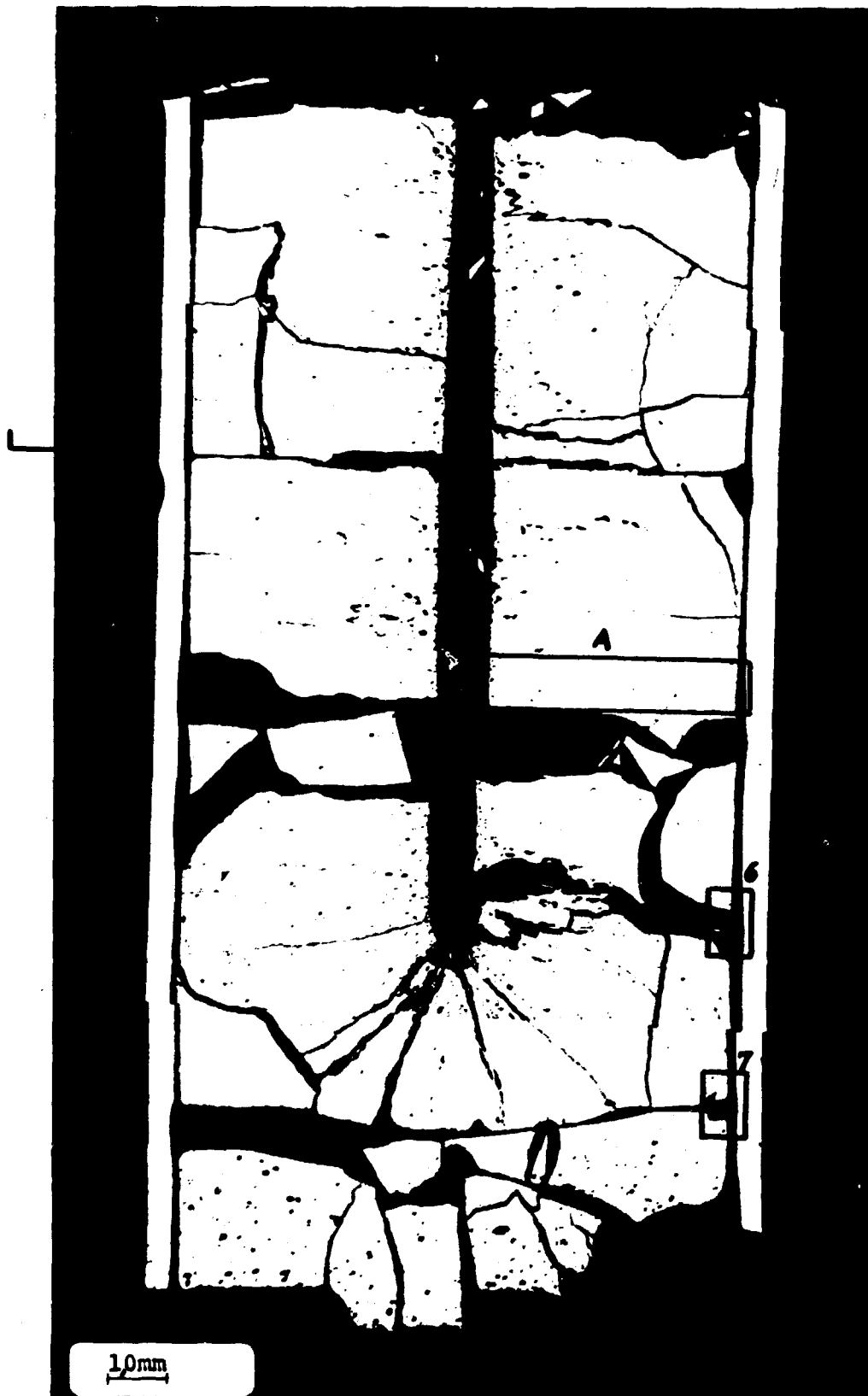
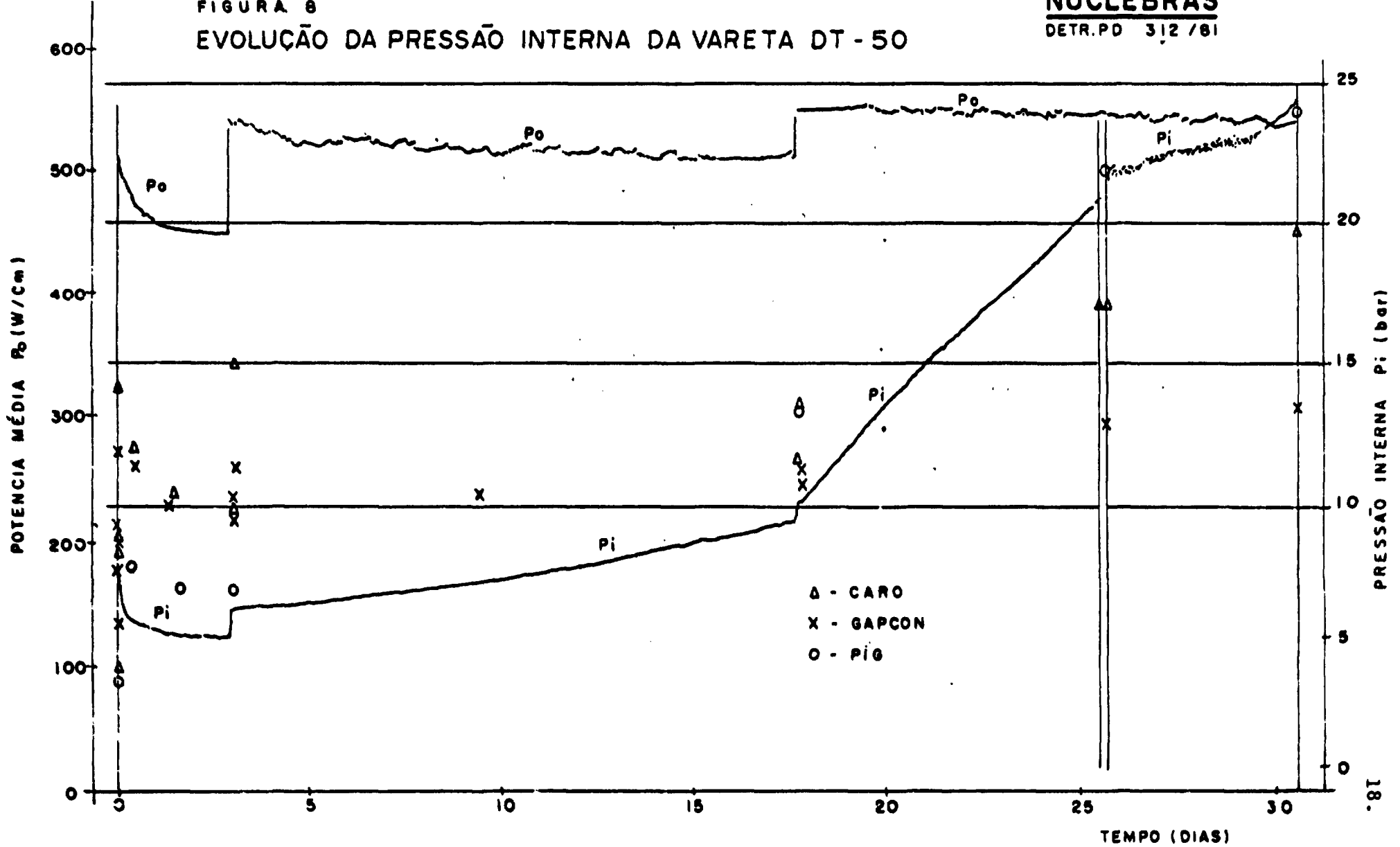


FIGURA 7
CORTE LONGITUDINAL DA VARETA-TESTE DT50

10-03-81

FIGURA 8
EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DA VARETA DT - 50

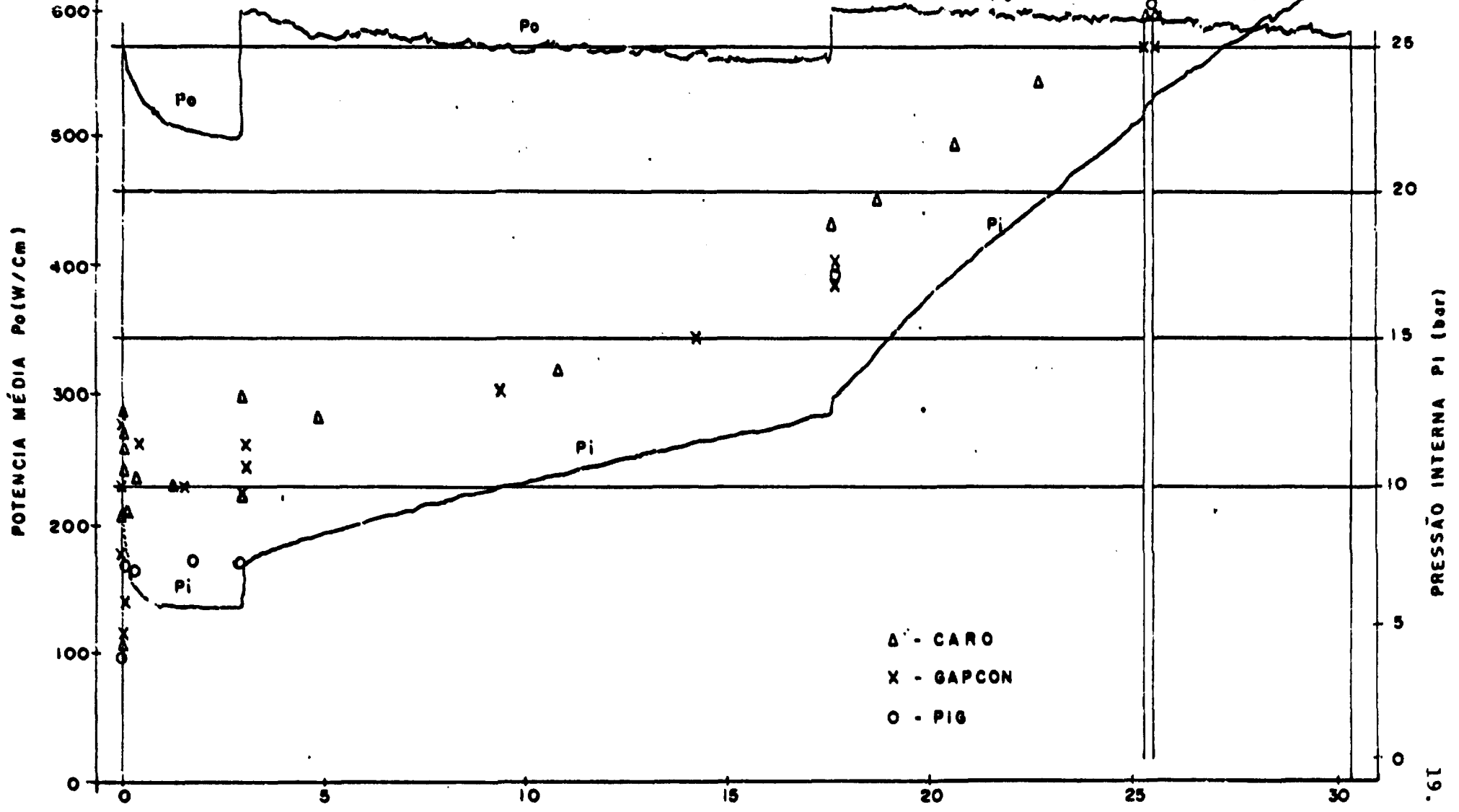
NUCLEBRÁS
DETR.PD 3/2/81



10-33-81

FIGURA 9
EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DA VARETA DT-51

NUCLEBRÁS
DETR. PD 313 / 81



Δ - CARO
X - GAPCON
O - PIG

11-03-81

FIGURA 10
EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DA VARETA DT-54

NUCLEBRÁS
DETR. PD 316/81

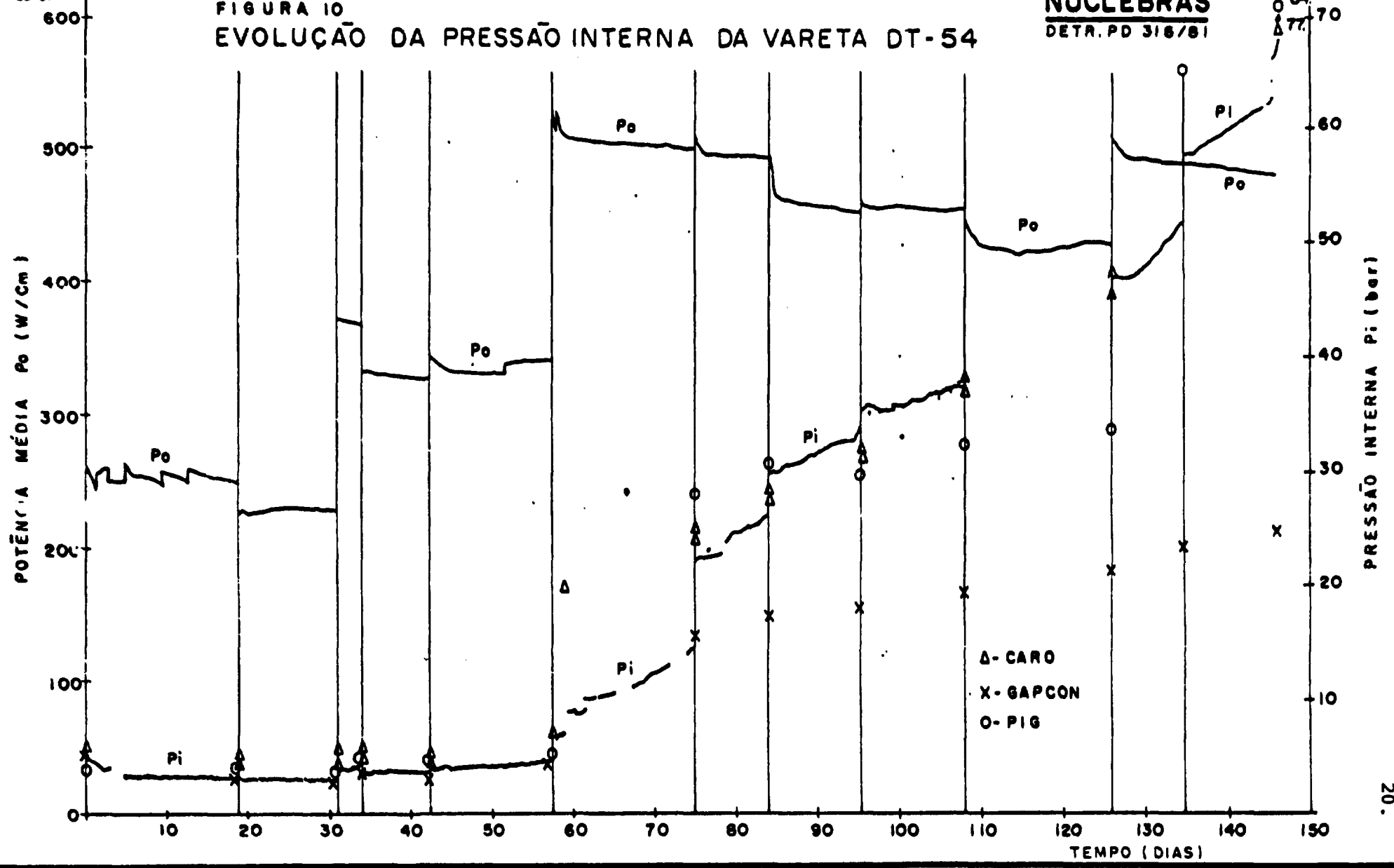
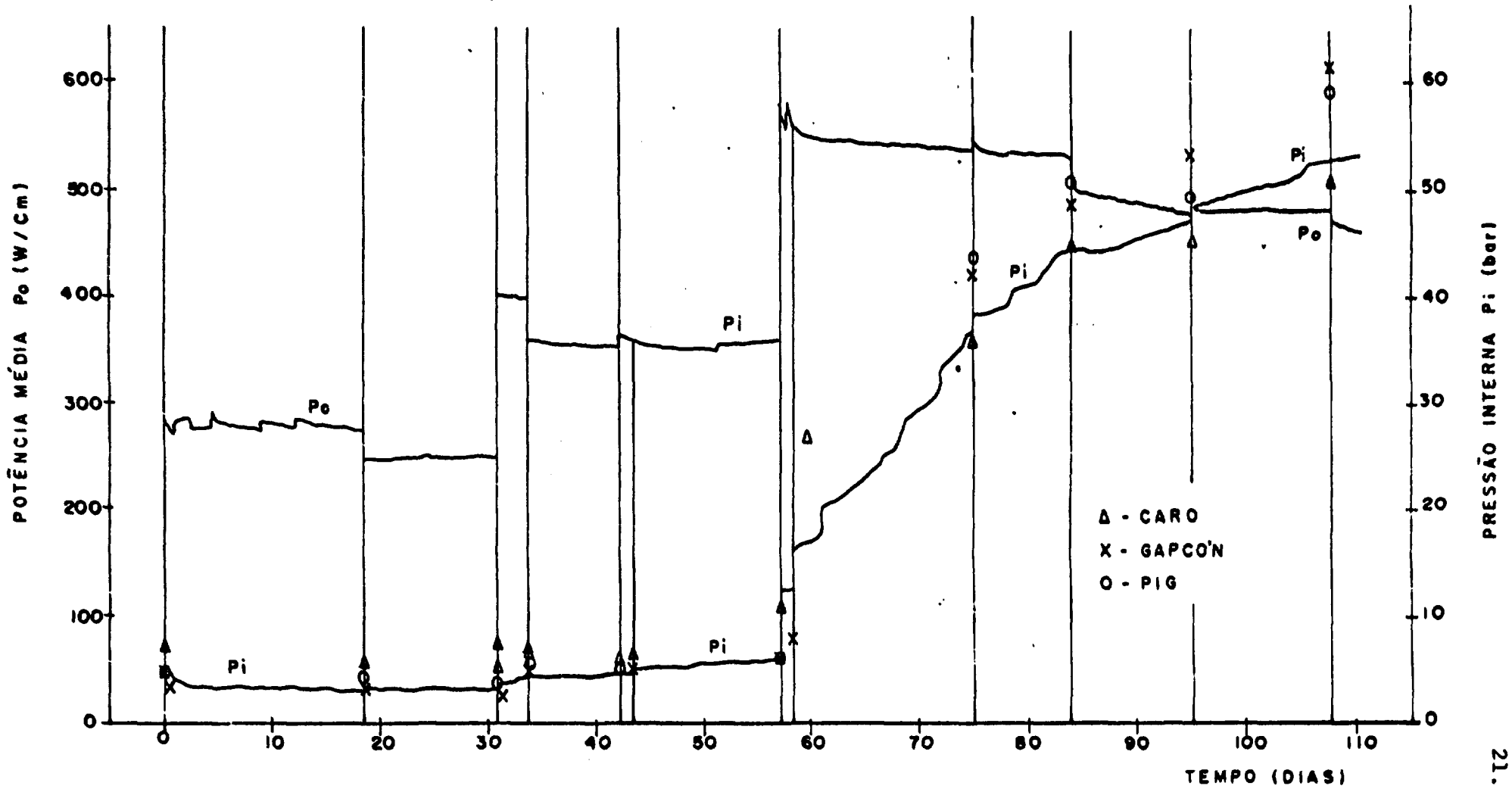


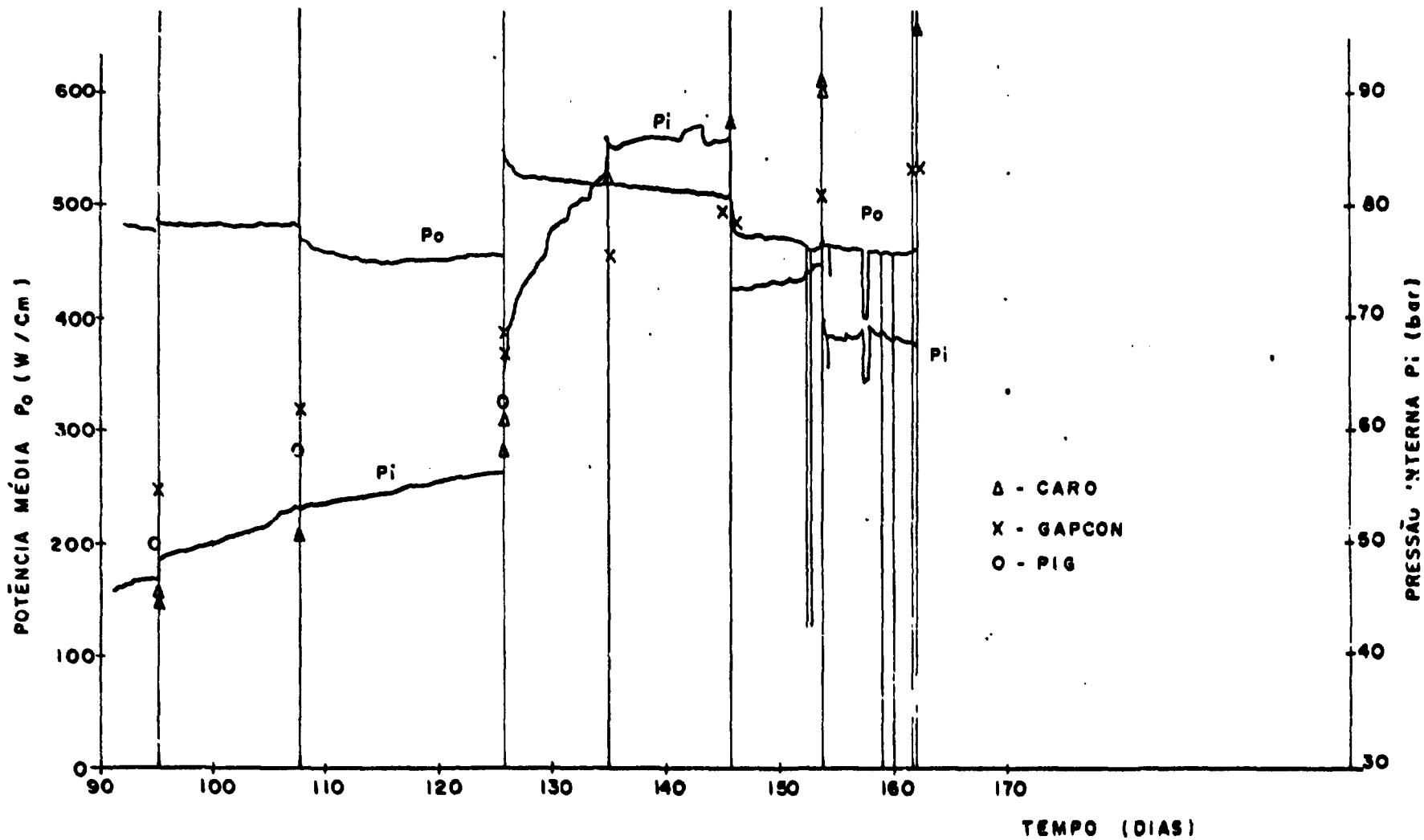
FIGURA II-A
EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DA VARETA DT - 55



10-03-81

FIGURA 11-B
EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA
DA VARETA DT - 55

NUCLEBRÁS
DETR.PD 314/81



NUCLEBRÁS/CDTN

Departamento de Tecnologia de Reatores

LISTA DE DISTRIBUIÇÃO DE PUBLICAÇÃO EXTERNA
NUCLEBRÁS/CDTN-434/81

Publicação:

LAMEIRAS, F.S. et al. Avaliação do Comportamento de Varetas Combustíveis-Teste sob Irradiação. Belo Horizonte, 1981. Trabalho (convidado) apresentado no II Encontro Nacional de Física de Reatores, realizado no Centrecon, Itaipava, RJ, 12-50 de abril de 1981.

Distribuição:

Nº Exempl.

NUCLEBRÁS:

Diretor	J.M.A. Forman	(1)
SUECO	M.V. do Val	(1)
SUPED	V.M.A. Silva	(1)
ASPC.PD	S. Paiano	(1)
DEEC.EC	P.G. Esteves	(1)
DEDI.SI	M.A. Diniz	(1)
DETR.PD	R.B. Pinheiro	(3)
	J.L. Terra	(3)
DETS.PD	A.O.R.S. Câmara	(1)
SEDOE.PD	L.L. Santos	(1)

NUCLEN:

Diretor Técnico	G. Herzog	(1)
-----------------	-----------	-----

KFA-Jülich

Zentralabteilung Brennelement und Bestrahlungstechnologie	S. Krawczynski	(1)
---	----------------	-----

CNEN:

Centro de Informações Nucleares		(1)
---------------------------------	--	-----

IPEN:

Divisão de Informações e Documentação Científica		(1)
--	--	-----

UFMG:

Deptº de Eng ^a Nuclear	B. Cimbleiris	(1)
-----------------------------------	---------------	-----

UFPE:

Deptº de Eng ^a Nuclear	C.C. da Silva	(1)
-----------------------------------	---------------	-----

Belo Horizonte, 27.4.81

Total de Cópias (20)


RICARDO BRANT PINHEIRO
Chefe do DETR.PD


VIRGÍLIO M. DE ANDRADE E SILVA
Superintendente de SUPED