

BR8206759

INIS-mf--7828



11 08 82

RESFRIAMENTO DE SEGURANÇA POR IMERSÃO
Valter Quilici Pereira

Belt

C.C.T.N./E.E.U.F.M.G.

SETEMBRO - 1981

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
E.E.U.F.M.G. - Departamento de Engenharia Nuclear

RESFRIAMENTO DE SEGURANÇA POR IMERSÃO

Valter Quilici Pereira

Tese apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais,
como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

setembro - 1981

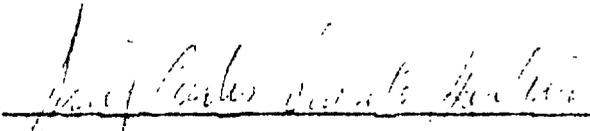
TÍTULO DA TESE

Resfriamento de Segurança por Imersão

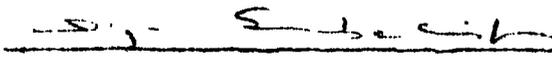
NOME DO AUTOR

Valter Qillici Pereira

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora, constituída dos Senhores:


M.Sc. Luiz Carlos Duarte Ladeira


M.Sc. Walkirio Ronaldo de Andrada Lavorato

Orientador: 
M.Sc. Olga Cortes Rabelo Leão Simbalista

Belo Horizonte, 23 de dezembro de 1981
(Data de defesa da tese)

Para:

Antonieta (em memória)

Delma

A G R A D E Ç O :

- a Nuclebrás S.A., em cujo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear de Belo Horizonte - M.G. (NUCLEBRÁS / CDTN) foi realizado este trabalho ;
- a Dra. Olga C.R.L. Simbalista pela orientação ;
- ao Dr. Paulo C. Tófani pela sugestão do tema ;
- ao Dr. Luiz C. D. Ladeira pelo auxílio no aparelhamento do circuito onde foram realizados os testes ;
- ao Emil dos Reis; Sálvio de O. Moraes; José Délio Santiago; Luiz Duarte; Clotilde Rebello Wergles; Valdir Gante; Marcos Antonio Trindade Pereira; Marilha Gilberta Viegas; Anízio M. Garrido Filho; Antonio Carlos Fernandes da Silva (desenhos iniciais do capítulo II) ;
- ao Instituto de Engenharia Nuclear (C.N.E.N./I.E.N.) onde trabalho, em especial aos Drs. Engs. Silvério Carlos Belo Lisboa e Luiz Osório de Brito Aghina pelas facilidades oferecidas ;
- a Comissão Nacional de Engenharia Nuclear do Brasil (C.N.E.N.) cujo auxílio, na forma de bolsa de estudos, proporcionou a realização deste trabalho.

S U M Á R I O

I INTRODUÇÃO

II APRESENTAÇÃO DO ESTUDO

2.1 Introdução

2.2 Descrição de um Acidente de Perda de Refrigerante

2.3 Sistema de Refrigeração de Emergência do Núcleo

2.4 Ação do Sistema de Refrigeração de Emergência do Núcleo Após um LOCA

2.5 Mecanismo de Transferência de Calor Durante o Remo- lhamento das Barras Combustíveis de um Reator PWR

2.6 Estudos Experimentais

Tabela II-1

Figuras de II-1 à II-10

III DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

3.2 Descrição do Circuito

3.2.1 Circuito Suporte Nº 1

3.2.2 Seção de Testes

3.2.2.1 Seção de Testes Tubular

3.2.2.2 Seção de Testes Anular

3.2.3 Alimentação Elétrica

3.2.3.1 Circuito Elétrico de Alimentação da

Seção de Testes

3.2.3.2 Circuito Elétrico de Alimentação do Pré-aquecedor

3.2.4 Controle e Medidas

3.2.4.1 Medidas de Vazão

3.2.4.2 Medidas de Pressão

3.2.4.3 Medidas de Tensão Elétrica

3.2.4.4 Medidas de Temperatura

3.2.4.4.1 Temperatura de Fluido na En trada da Seção de Testes

3.2.4.4.2 Temperaturas de Parede

3.3 Testes Iniciais de Aferição e Desempenho

3.3.1 Aferição do Manômetro Situado na Entrada da Seção de Testes

3.3.2 Aferição dos Rotâmetros

3.3.3 Calibração do Sistema de Medida de Temperatu- ra do Líquido

3.3.4 Calibração do Dispositivo de Tomada de Tempe- ratura na Parede da Seção de Testes

3.3.5 Teste de Isolamento Hidráulico e Elétrico do Circuito

3.3.6 Desempenho do Circuito

3.4 Processo Operatório

3.4.1 Colocação do Circuito em Funcionamento

3.4.2 Estabelecimento das Condições de Teste

3.4.3 Procedimento Durante um Teste

3.4.4 Desligamento do Circuito

Figuras de III-1 à III-9

IV AS CAMPANHAS DE TESTES

- 4.1 Introdução
- 4.2 Delimitação das Faixas de Variação dos Parâmetros
 - 4.2.1 Vazão - Velocidade de Injeção de Refrigerante
 - 4.2.2 Temperatura de Parede
 - 4.2.3 Pressão
 - 4.2.4 Temperatura de Entrada do Refrigerante
 - 4.2.5 Potência de Aquecimento da Seção de Testes
 - 4.2.6 Faixas Delimitadas para as Grandezas
- 4.3 Campanha de Testes
 - 4.3.1 Campanha de Testes - Seção de Testes Tubular
 - 4.3.1.1 Testes Preliminares
 - 4.3.1.2 Testes com Isolamento Térmico
 - 4.3.1.3 Testes sem Isolamento Térmico
 - 4.3.1.4 Testes Complementares
 - 4.3.2 Campanha de Testes - Seção de Testes Anular
- 4.4 Apresentação dos Resultados

Tabelas IV-1 e IV-2

Figuras de IV-1 à IV-8

V ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

- 5.1 Introdução
- 5.2 Reprodutividade dos Testes
- 5.3 Ocorrência de Refrigeração por Escoamento Descendente
- 5.4 Distribuição Típica da Temperatura de Parede ao Longo da Seção de Testes no Início de um Teste

5.5 Variação da Temperatura de Parede Durante o Remo -
lhamento

5.6 Temperatura de Retorno

5.7 Influência da Temperatura Inicial de Parede

5.8 Influência da Taxa de Injeção

5.9 Velocidade da Frente de Molhamento (Velocidade de
Frente de Têmpera)

5.10 Potência de Aquecimento da S.T.

5.11 Temperatura Final de Parede (T_{pf})

5.12 Testes de Visualização

Tabelas V-1 e V-2

Figuras de V-1 à V-15

VI CONCLUSÃO

N O T A Ç Ã O

Q	\equiv	Vazão do Refrigerante
P	\equiv	Potência de Aquecimento da Seção de Testes
$v_i; v_{inj}$	\equiv	Velocidade de Injeção do Refrigerante
v_{nm}	\equiv	Velocidade de Remolhamento entre os termopares n e m
T_e	\equiv	Temperatura de Entrada do Refrigerante na Seção de Testes
T_{amb}	\equiv	Temperatura Ambiente
T_{pi}	\equiv	Temperatura Inicial de Parede
T_{pn}	\equiv	Temperatura Inicial da Parede na Posição do Ter - mopar n
T_{pf}	\equiv	Temperatura Final de Parede
T_s	\equiv	Temperatura de Saturação do Fluido Refrigerante
T_r	\equiv	Temperatura do Refrigerante
V'	\equiv	Tensão Inicial Aplicada à Seção de Testes
ΔV	\equiv	Variação da Tensão Durante o Teste
t	\equiv	tempo
t_{qn}	\equiv	tempo de Molhamento na Posição do Termopar n após o início do Teste
t_{nm}	\equiv	tempo de Remolhamento entre os Termopares n e m
ppm	\equiv	partes por milhão
$m.c.a.$	\equiv	metros de coluna d'água
CHF	\equiv	Critical Heat Flux
DNB	\equiv	Departure from Nucleate Boiling
PWR	\equiv	Pressurized Water Reactor

S.T. ≡ Seção de Testes
STT ≡ Seção de Testes Tubular
STA ≡ Seção de Testes Anular
SREN ≡ Sistema de Refrigeração de Emergência do Núcleo
SIS ≡ Sistema de Injeção de Segurança
SRCR ≡ Sistema de Remoção de Calor Residual
SRR ≡ Sistema de Refrigeração do Reator

ÍNDICE

RESUMO	1
ABSTRACT	2
I INTRODUÇÃO	3
II APRESENTAÇÃO DO ESTUDO	6
2.1 Introdução	6
2.2 Descrição de um Acidente de Perda de Refrigerante	6
2.3 Sistema de Refrigeração de Emergência do Núcleo	12
2.4 Ação do Sistema de Refrigeração de Emergência do Núcleo Após um LOCA	16
2.5 Mecanismo de Transferência de Calor Durante o Remo- lhamento das Barras Combustíveis de um Reator PWR	19
2.6 Estudos Experimentais	22
Tabela II-1	26
Figuras de II-1 à II-10	31/40
III DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	41
3.1 Introdução	41
3.2 Descrição do Circuito	41
3.2.1 Circuito Suporte Nº 1	41
3.2.2 Seção de Testes	43
3.2.2.1 Seção de Testes Tubular	43
3.2.2.2 Seção de Testes Anular	45
3.2.3 Alimentação Elétrica	46
3.2.3.1 Circuito Elétrico de Alimentação da	

Seção de Testes	47
3.2.3.2 Circuito Elétrico de Alimentação do Pré-aquecedor	47
3.2.4 Controle e Medidas	47
3.2.4.1 Medidas de Vazão	47
3.2.4.2 Medidas de Pressão	47
3.2.4.3 Medidas de Tensão Elétrica	48
3.2.4.4 Medidas de Temperatura	48
3.2.4.4.1 Temperatura de Fluido na En- trada da Seção de Testes	48
3.2.4.4.2 Temperaturas de Parede	49
3.3 Testes Iniciais de Aferição e Desempenho	50
3.3.1 Aferição do Manômetro Situado na Entrada da Seção de Testes	50
3.3.2 Aferição dos Rotâmetros	51
3.3.3 Calibração do Sistema de Medida de Temperatu- ra do Líquido	51
3.3.4 Calibração do Dispositivo de Tomada de Tempe- ratura na Parede da Seção de Testes	52
3.3.5 Teste de Isolamento Hidráulico e Elétrico do Circuito	53
3.3.6 Desempenho do Circuito	53
3.4 Processo Operatório	54
3.4.1 Colocação do Circuito em Funcionamento	54
3.4.2 Estabelecimento das Condições de Teste	55
3.4.3 Procedimento Durante um Teste	56
3.4.4 Desligamento do Circuito	57
Figuras de III-1 à III-9	58/66

IV AS CAMPANHAS DE TESTES	67
4.1 Introdução	67
4.2 Delimitação das Faixas de Variação dos Parâmetros	67
4.2.1 Vazão - Velocidade de Injeção de Refrigerante	68
4.2.2 Temperatura de Parede	68
4.2.3 Pressão	69
4.2.4 Temperatura de Entrada do Refrigerante	69
4.2.5 Potência de Aquecimento da Seção de Testes	70
4.2.6 Faixas Delimitadas para as Grandezas	70
4.3 Campanha de Testes	71
4.3.1 Campanha de Testes - Seção de Testes Tubular	71
4.3.1.1 Testes Preliminares	72
4.3.1.2 Testes com Isolamento Térmico	73
4.3.1.3 Testes sem Isolamento Térmico	74
4.3.1.4 Testes Complementares	75
4.3.2 Campanha de Testes - Seção de Testes Anular	76
4.4 Apresentação dos Resultados	76
Tabelas IV-1 e IV-2	78/82
Figuras de IV-1 à IV-8	83/90
V ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	91
5.1 Introdução	91
5.2 Reprodutividade dos Testes	91
5.3 Ocorrência de Refrigeração por Escoamento Descendente	92
5.4 Distribuição Típica da Temperatura de Parede ao Longo da Seção de Testes no Início de um Teste	93

5.5	Variação da Temperatura de Parede Durante o Remo - lhamento	94
5.6	Temperatura de Retorno	95
5.7	Influência da Temperatura Inicial de Parede	95
5.8	Influência da Taxa de Injeção	97
5.9	Velocidade da Frente de Molhamento (Velocidade de Frente de Têmpera)	97
5.10	Potência de Aquecimento da S.T.	98
5.11	Temperatura Final de Parede (T_{pf})	98
5.12	Testes de Visualização	99
	Tabelas V-1 e V-2	101/102
	Figuras de V-1 à V-15	103/117
VI	CONCLUSÃO	118
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	122/132

R E S U M O

~~Este trabalho consiste do estudo~~ ^{Estudar-se} teórico e experimental ^{os} dos fenômenos transitórios lentos envolvidos no processo de remolhamento de núcleos de reatores a água pressurizada, quando de seu resfriamento de segurança por injeção de líquido. Para isto, foi utilizado um circuito térmico a água, de baixa pressão e baixo fluxo térmico, onde instalou-se dois tipos de seção de testes, uma tubular e outra anular. Após o aquecimento, da seção de testes, por efeito Joule, ela foi refrigerada por água, à temperatura ambiente, em escoamento forçado ascendente. Foram investigados os efeitos da temperatura de parede e da vazão de refrigerante na eficiência do processo de remolhamento. Resultados compatíveis com os de outros laboratórios foram obtidos. (autor).

A B S T R A C T

* was done

~~This work consists of a~~ theoretical and experimental study of the slow transient phenomena encountered during emergency core cooling rewetting of pressurized water reactors.* To perform this study a low pressure and low heat flux water loop was used, with two basic tests sections, one tubular and another annular. After being heated by the Joule effect, the test section was quenched at a constant flow rate by bottom flooding of water at room temperature. The effects of wall temperature and fluid flow rate in the performance of the rewetting process were investigated. Our results were in good agreement with those obtained by other laboratories. (author).

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O Remolhamento é uma das fases do processo de refrigeração de um Reator a água leve (PWR), após a ocorrência do acidente de perda de refrigerante (LOCA). Uma enorme quantidade de experiências tem sido realizada em todo o mundo, nos últimos anos, para investigar a eficácia da transferência de calor durante a fase do remolhamento em condições de LOCA. Simultaneamente, grandes esforços têm se realizado, tanto experimental quanto teóricamente, para que seja adquirida a compreensão dos fenômenos termohidráulicos básicos que ocorrem durante este processo.

Este trabalho, essencialmente, consistiu do estudo teórico-experimental dos fenômenos envolvidos no processo de remolhamento de núcleos de PWRs, quando de seu resfriamento de segurança por injeção de líquido.

Para isso utilizou-se das instalações do Laborató - rio de Termohidráulica do Centro de Desenvolvimento da Tecno - logia Nuclear (NUCLEBRÁS/CDTN), localizado em Belo Horizonte - Estado de Minas Gerais e que dispõe de um circuito a água de baixa pressão e baixo fluxo térmico. Nesse circuito foi instalada, a princípio, uma seção de testes vertical, de geometria

tubular, que após aquecimento por efeito Joule, foi refrigerada internamente por água em escoamento ascendente forçado. Posteriormente, instalou-se uma seção de testes, também vertical, de geometria anular, cujo princípio de funcionamento é semelhante ao da seção de testes tubular.

Dessa forma, tratou-se de pesquisar os fenômenos físicos transitórios lentos que ocorrem na interface seção de testes-água, simulando a interface revestimento de combustível-refrigerante, valendo-se para isto do estudo da literatura disponível relativa a fenômenos térmicos, ligados a remoção de calor em condições acidentais de núcleos e da participação de aquisições e montagens, relativas ao reaparelhamento do circuito existente, de sua operação, da coleta, tratamento e, finalmente, análise dos resultados.

Para a obtenção das condições experimentais no dispositivo de testes foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica, em especial, na literatura relativa a trabalhos experimentais já realizados por outros laboratórios, assim como dos subsídios fornecidos por estes trabalhos ao desenvolvimento teórico de modelos de análise para a previsão do comportamento do núcleo de reatores, quando em presença do remolhamento.

Fundamentado nisso, o trabalho aqui apresentado foi subdividido nas seguintes etapas:

- Estudo bibliográfico relativo à ocorrência de um acidente de perda de refrigerante em um reator nuclear, à atuação dos sistemas de refrigeração de emergência e à caracterização do fenômeno de remo_lhamento.
- Descrição do dispositivo experimental utilizado.
- Descrição das campanhas de testes e apresentação dos resultados.
- Análise dos resultados.
- Conclusões.

CAPÍTULO II

APRESENTAÇÃO DO ESTUDO

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados aspectos relativos à ocorrência de um acidente de perda de refrigerante, em um reator a água pressurizada, seguido da atuação do sistema de refrigeração de emergência, visando o estabelecimento de condições de remoção de calor compatíveis com o nível de calor residual remanescente, após a atuação dos sistemas de desligamento nucleares. Para situar este trabalho são apresentados cronologicamente programas experimentais mais importantes, já realizados, em âmbito mundial.

2.2 DESCRIÇÃO DE UM ACIDENTE DE PERDA DE REFRIGERANTE

Sob o aspecto da segurança de um reator PWR o acidente de perda de refrigerante (L.O.C.A. - Loss Of Coolant Accident) é o que acarreta consequências mais sérias para uma Central Nuclear. Esse acidente é definido como sendo a sequência de eventos que resulta da perda do refrigerante do reator a taxas que excedem a capacidade de restauração do sistema de controle químico e volumétrico do Reator (1).

Uma ruptura de qualquer proporção e em qualquer posição do circuito primário do reator caracteriza um LOCA. No entanto, para efeitos de normas aplicáveis ao licenciamento de centrais nucleares, convencionou-se definir o caso mais crítico. Para os propósitos analíticos, essas normas definem que o LOCA é iniciado pela ruptura repentina e completa (ruptura "guilhotina") da tubulação principal do circuito primário num ponto localizado entre a bomba e o vaso de pressão do reator ("perna fria" da tubulação do sistema) (2).

Nestas condições têm-se pois a ocorrência de fluxo do refrigerante no local da ruptura e despressurização do sistema, uma vez que, em condições médias de operação de PWR, têm-se:

Pressão no circuito primário	-	150 bar
Pressão na contenção	-	5 bar
Temperatura do refrigerante	{ entrada	- 292 °C
	{ saída	- 326 °C
Temperatura externa do revestimento do combustível	-	340 °C
Velocidade de injeção do refrigerante	-	4,5 m/s

A FIGURA II-1 mostra o fluxo do refrigerante no circuito primário de um reator em operação normal.

A FIGURA II-2 ilustra a ocorrência de um LOCA na perna fria de um PWR, com a ruptura ocorrendo no ramo da di -

reita com a indicação do fluxo do refrigerante presente em tal situação.

Imediatamente após a ruptura, o refrigerante flui através dela e se vaporiza ao contacto com a atmosfera da contenção. Escoa-se tanto o refrigerante que, por ação da bomba do circuito primário, deveria ser injetado no interior do núcleo do reator como aquele que já está em seu interior. A porção de refrigerante que já está no núcleo reverte sua direção de fluxo devido a diferença entre a taxa de despressurização das câmaras plenas superior e inferior. É essa taxa que determina a magnitude e direção de escoamento no núcleo, como também as tensões e vibrações das estruturas do vaso do reator.

Assim, a fase inicial de despressurização, que dura entre 0,1 a 2 segundos, caracteriza-se por grandes oscilações de escoamento nos canais. A pressão que estava em torno de 150 bar cai para a pressão de saturação correspondente à temperatura do fluido refrigerante no local da ruptura (e. g. 100 bar para 315 °C) (3).

Depois disso, a queda de pressão ocorre mais lentamente em decorrência do fato de que a velocidade de escoamento do fluido refrigerante através da brecha é limitada pelo fenômeno conhecido como vazão crítica. Nessa fase, a queda de pressão não é tão abrupta, sendo da ordem de 3 - 30 bar/s (4). Ao final desta fase, a de despressurização saturada, que dura cerca de 15 segundos, as pressões da contenção e das tubula -

ções do circuito primário se igualam (valor da ordem de 5 bar), e o escoamento pela ruptura cai a zero. (FIGURA II-3)

O aumento da fração de vazios que ocorre desde os primeiros instantes do LOCA tem um efeito de anti-reatividade que tende a diminuir as reações nucleares por neutrons lentos. Por outro lado, essas condições anormais que aparecem na fase de despressurização, como a queda excessiva da pressão no circuito primário e a alta pressão no edifício da contenção, são detetadas pela instrumentação de controle que ativa primeiramente o desligamento do reator pela queda das barras de controle que vão paralizar a maior parte das reações de fissão e depois o Sistema de Refrigeração de Emergência do Núcleo (S. R.E.N.).

Logo após a ocorrência da ruptura, ocorre uma redução na eficiência do processo de remoção de calor até então presente, e a temperatura do revestimento das barras combustíveis sobe rapidamente. O aumento da temperatura ocorre durante cerca de 8 segundos (5) e é devido à redução da vazão do refrigerante, ao aumento do título local e conseqüentemente ocorrência de uma "crise de ebulição". A deteriorização do processo eficaz de remoção de calor induz à ocorrência da condição denominada fluxo crítico de calor (CHF). Essa condição de CHF pode ser do tipo DNB (baixo título) ou DRYOUT (alto título) ou uma combinação de ambos. A ocorrência de CHF causa o aumento da temperatura do revestimento do combustível que passa a ser refrigerado através de ebulição em filme ou simplesmente por vapor.

Dessa forma, reduzem-se drasticamente os coeficientes de transferência de calor e há uma redistribuição do calor armazenado e uma equalização de temperatura entre o combustível e o revestimento, com possibilidade de deformar e deteriorar esse revestimento. As possibilidades de dano ao revestimento, em geral não são grandes por causa do aumento da fração de vazios no núcleo e o desligamento do reator que produz diminuição da potência térmica. Em consequência disso a temperatura no centro dos elementos combustíveis diminui e a quantidade de energia armazenada não será muito grande.

No entanto a desintegração dos núcleos radioativos por neutrons atrasados libera ainda quantidades de energia, na forma de calor, estimadas em 10% da potência nominal do reator (6). Essa quantidade de calor produzida decresce lentamente segundo uma lei exponencial e dois dias após o acidente passa a um valor de 1 a 2%. É a potência residual (calor de decaimento) que por suas consequências representa o maior perigo ao reator e é a responsável pelo transitório térmico pelo qual passa o revestimento.

Se o calor residual que continua a ser produzido não pudesse ser retirado, isto faria com que a temperatura do núcleo aumentasse à razão de mais ou menos 5 a 10 °C/s (6) (7). Em torno de 800 °C as deformações, devidas à dilatação do material que compõe o revestimento da barra combustível, sob a ação conjugada da pressão interna dos gases de fissão e da temperatura, se transformam em buracos que liberam os produtos de fissão gasosos no interior do vaso de pressão. Ao fim de alguns segundos o revestimento do combustível, em Zircaloy, atingiria a tem

peratura de 1100°C a partir da qual começa a reação vapor d'água - Zircaloy, reação exotérmica com desprendimento de hidrogênio (8). Nesse instante mesmo que entrasse em ação um dispositivo para refrigerar as barras, ele só poderia ser nocivo, uma vez que a temperatura aumenta rapidamente e essa injeção aumentaria a quantidade de hidrogênio, fazendo crescer a possibilidade de uma explosão.

A partir desse ponto começa a desativação do núcleo, pois, mais ou menos, uma hora após a ruptura, as barras combustíveis não refrigeradas se fundirão por causa do calor residual.

Pouco a pouco todo o conjunto que constitui o núcleo do reator atinge o estado pastoso e produtos de fissão mais óxido de urânio e mais o material das estruturas do núcleo fundidos desabam na água que ainda resta no fundo do vaso de pressão do reator e há o início de várias reações químicas exotérmicas entre o material fundido e a mistura água-vapor, parte da qual produz também hidrogênio (9).

O que era o núcleo do reator constitui agora uma lava em fusão (3000°C) que tem sua própria fonte de energia e está em contato com o fundo do vaso de pressão do reator cujas paredes começam a rachar e fundir. Acredita-se que, para os reatores atuais, o período de uma hora após o desabamento do núcleo é o suficiente para que o vaso de pressão seja perfurado. Essa lava agora se escoar para o vaso de contenção e ao fim de algum tempo, que varia de acordo com a espessura do concreto do vaso de contenção, os produtos de fissão são liberados.

Ocorre então a liberação de gases na atmosfera e a lava começa a se infiltrar na Terra em direção ao seu centro, causando consequências biológicas e ecológicas que, na atualidade, não são passíveis de se visualizar (10).

Para que o aumento da temperatura do revestimento não ocorra, quando da redução na eficiência do processo de remoção de calor, é necessário que se injete refrigerante para retirar energia e diminuir os efeitos da potência residual. Esta é a função do Sistema de Refrigeração de Emergência do Núcleo.

2.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE EMERGÊNCIA DO NÚCLEO - SREN

Limitar o aumento da temperatura do revestimento do combustível do reator e assegurar que o núcleo permaneça intacto, no lugar e com sua geometria de transferência de calor inalterada, são as funções do SREN. Ele executa essas funções injetando água borada quando da ocorrência de um acidente de perda de refrigerante.

O sistema de refrigeração de Emergência do Núcleo (SREN) é o resultado da associação do Sistema de Injeção de Segurança (SIS) com o Sistema de Remoção de Calor Residual (SRCR) e para o reator a água pressurizada (PWR) os componentes básicos do SREN são de três espécies (11) (12) :

a - Bombas de Injeção à Alta Pressão (Bombas de Injeção de Segurança)

São bombas centrífugas e horizontais, movidas

por motores elétricos que succionam água borada do tanque de Injeção de Boro que contém solução a 12% de ácido bórico - 20000 ppm de boro. Essas bombas são de alta pressão e baixa vazão e estão conectadas às linhas de injeção das pernas frias.

Em volume, a quantidade de refrigerante do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR) deve ser constante. No entanto, se ocorrer uma ruptura pequena ou se houver um pequeno vazamento de qualquer natureza e a pressão do SRR permanecer alta (permanecer na faixa de variação de -150 a 120 bar), essas bombas entram em ação, pois a finalidade delas é fornecer, num caso desses, água borada ao Sistema de Refrigeração do Reator. A pressão de descarga dessas bombas é ligeiramente inferior à operação do SRR para evitar injeção inadvertida durante operação normal.

b - Acumuladores

São vasos pressurizados que se ligam à perna fria do circuito primário através de tubulação e de válvulas de retenção automáticas que se abrem por diferença de pressão. Eles têm por função retardar o secamento do núcleo do reator. Estes vasos contêm água borada (1950ppm de Boro) sob pressão de Nitrogênio que varia de 14 a 44 bar. Se a pressão do SRR cai a um valor abaixo da pressão do gás nos acumuladores, as válvulas se abrem, pro-

vocando a rápida descarga de um grande volume de água dos acumuladores no vaso de pressão e no núcleo do reator.

Os acumuladores são dispositivos considerados passivos pois a injeção é forçada pela pressão do Nitrogênio neles contido, não sendo preciso fonte de potência externa ou transmissão de sinal de atuação.

A capacidade desses acumuladores é calculada de tal forma que o volume de fluido proveniente de dois deles (reator com 4 circuitos) é suficiente para recobrir o núcleo até a metade, admitindo-se que o fluido dos outros dois se derrame no vaso de contenção através da ruptura.

c - Bombas de Remoção de Calor Residual - SRCR (Bombas à baixa pressão).

As bombas de remoção de calor residual são utilizadas para fornecer uma grande quantidade de água borada, à baixa pressão, para o SRR. Elas são bombas verticais, centrífugas e movidas por motores elétricos.

Esse sistema de bombas entra em atuação no caso de grandes rupturas que resultem na despressurização rápida e na ejeção do refrigerante primário.

Elas devem entrar em atividade quando a pressão se torna suficientemente baixa , aproximadamente 20 bar, no interior do vaso de pressão do reator . Elas injetam água borada nas pernas frias, bem próximo ao ponto em que a tubulação se liga ao espaço anular (downcomer) que separa o núcleo do vaso do reator. E é por intermédio do espaço anular que essa água chega ao fundo do vaso de pressão. Elas também são usadas para recircular água do poço da contenção para o reator e para a sucção das bombas de alta pressão.

As bombas de remoção do calor residual retiram água do tanque de armazenamento da Água de Recarregamento. A capacidade desse tanque é dimensionada para fornecer:

- um volume de água suficiente para reencher o vaso do reator até um ponto acima dos orifícios de entrada e saída de refrigerante;
- um volume de água borada suficiente para prevenir totalmente o retorno à criticalidade, com o reator desligado a frio e todas as barras de controle, exceto a mais reativa, inseridas no núcleo;
- um volume de água no poço da contenção, sufi -

ciente para permitir o início da recirculação.

2.4 - AÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE EMERGÊNCIA DO NÚCLEO APÓS UM LOCA

A sequência de eventos após a ocorrência de um LOCA em um reator cujo SREN esteja em perfeitas condições de funcionamento pode ser dividido nas seguintes fases:

1 - Fase do Blowdown (descompressão)

2 - Fase de Atividade do SREN

2.1 - Enchimento da Câmara Plena Inferior
(REFILLING)

2.2 - Remolhamento do Núcleo (REFLOODING)

A atuação do SREN tem início durante o princípio da fase do Blowdown. Durante a fase de despressurização o refrigerante proveniente das bombas de alta pressão é, em geral, o primeiro a ser injetado. (*) Logo, também, o sistema de baixa pressão é ativado a uma vazão muito alta. O refrigerante é injetado nas pernas frias, escoando através do espaço anular do vaso de pressão, no sentido da câmara plena inferior. Entretanto esse escoamento pode ser desviado e descarregado direta

(*) Deve-se ressaltar que o tempo necessário, para o início do funcionamento de cada um dos componentes do SREN, à partir da ocorrência do acidente, vai depender da velocidade da despressurização que, por sua vez, depende do tamanho e da localização do rompimento no sistema primário.

mente para a contenção através da ruptura (FIGURA II-4). Esse desvio de refrigerante (bypass) é devido ao vapor ou mistura bifásica que é formado por descompressão de uma quantidade grande de refrigerante (flashing) na região da câmara plena inferior. Esse vapor procura sair do vaso de pressão do reator provocando um fluxo ascendente do vapor, que se opõe ao fluxo do refrigerante de emergência até vencê-lo e fazer com que esse refrigerante se escoe pela ruptura (13).

Ao final de um certo tempo, o escoamento no espaço anular é invertido porque o SREN continua a injetar refrigerante que agora passa a escoar em direção a câmara plena inferior até enchê-la. Cerca de 30 segundos após o início do acidente, o nível do refrigerante atinge a parte inferior do núcleo. Este período é chamado de fase de reenchimento (REFILLING). Nesta fase a transferência de calor no núcleo, imerso em vapor estagnado, é baixa a ponto de ser considerada desprezível. (Período de Aquecimento Adiabático das Barras de Combustível). (14) (15).

A reinundação do núcleo e o esfriamento das barras combustíveis encontram uma série de resistências. Uma delas é a resistência hidráulica na câmara plena superior que se opõe a elevação do nível de refrigerante no núcleo. Esse efeito chamado de bloqueio de vapor (STEAM BIDDING) nada mais é do que a pressão exercida pelo vapor gerado no núcleo devido às altas temperaturas das barras. Outra resistência presente é a térmica, ocasionada pela camada de vapor que envolve a barra de combustível que está superaquecido e que é a responsável pelo retardo do remolhamento da barra.

O sistema de refrigeração de Emergência do Núcleo (FIGURA II - 6) tem três fases distintas de atuação, no sentido de refrigerar o núcleo: a fase de injeção passiva, a fase de injeção ativa e a fase de recirculação.

A fase de injeção passiva é iniciada pela abertura das válvulas de retenção dos acumuladores quando a pressão do SRR cai abaixo de 44 bar, fornecendo rapidamente e sem auxílio de potência externa, um grande escoamento de água borada para limitar um possível dano ao núcleo.

A fase de injeção ativa inicia-se 25s após o início do acidente, com o pleno funcionamento das bombas de alta e baixa pressão.

Como as bombas de injeção de baixa pressão succionam refrigerante do tanque de armazenamento, à medida que ele se esvazia, um novo suprimento de água deve ser fornecido para que o resfriamento seja contínuo. A nova fonte de água é o fluido injetado no SRR e derramado no fundo da contenção através da ruptura.

O início desta fase de recirculação é uma operação manual. Quando o nível no tanque de armazenamento atinge o ponto de alarme de baixo nível, o circuito de escoamento é alinhado de tal modo que as bombas de remoção do calor residual (baixa pressão) succionem do poço da contenção e descarreguem a água na sucção das bombas de injeção de segurança

(alta pressão), através dos trocadores de calor residual onde o resfriamento do fluido é realizado (13).

Vinte e quatro horas após o acidente, os circuitos de escoamento são realinhados para recircular através das pernas quentes. As bombas de baixa pressão passam a descarregar também para as pernas quentes, seja diretamente ou através das sucções das bombas de alta pressão, e destas para cada uma das pernas quentes.

2.5 - MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O REMOLHAMENTO DAS BARRAS COMBUSTÍVEIS DE UM REATOR PWR

Quando do escoamento de um refrigerante ao longo de uma superfície aquecida, existe um valor da temperatura dessa superfície acima do qual não ocorre o contato efetivo líquido /superfície. Esse valor crítico é conhecido como temperatura de Leidenfrost, temperatura de remolhamento, temperatura de espalhamento (sputtering), temperatura de "quenching", ou temperatura mínima de ebulição em filme.

No instante que antecede ao início da fase do remolhamento a barra combustível está completamente seca. À medida que essa fase é desencadeada pode se encontrar uma sucessão de regimes de transferência de calor na barra submetida ao "remolhamento". (FIGURA II - 7). As observações visuais de mostram a existência de uma frente de remolhamento que é a fronteira localizada entre os regimes de ebulição por filme

e o regime de transição de vapor. Essa frente de remolhamento avança ao longo da barra com velocidade praticamente constante, visivelmente menor que a velocidade de injeção do refrigerante (16), (17), e sua localização pode ser determinada a partir do histórico da temperatura do revestimento. O instante no qual a temperatura do revestimento inicia uma rápida queda até a temperatura de saturação do fluido, indica a chegada da frente de remolhamento àquele ponto.

A montante dessa frente de molhamento, o calor é removido da barra pelos mecanismos de transferência de calor por convecção em presença de ebulição nucleada e ebulição de transição. A jusante dela, na parte seca da barra, essa transferência de calor é feita por radiação, por convecção natural e forçada do vapor em escoamento disperso (Fog Flow), em escoamento anular inverso e por condução axial do calor ao longo da superfície aquecida, a partir da região "seca" e em direção à região "molhada" onde o coeficiente de transferência de calor pode ser muitas vezes maior que o coeficiente de transferência de calor na região "seca". A refrigeração da porção seca da barra diretamente por convecção e por radiação é chamada de refrigeração precursora.

A importância relativa dos dois mecanismos de refrigeração, a condução axial e a refrigeração precursora, dependem da situação física. No caso da refrigeração descendente, na forma de "spray", a transferência de calor à montante da frente de molhamento é desprezível e a condução é o mecanismo

predominante. No caso da refrigeração ascendente, a jusante da frente de molhamento, a refrigeração da superfície "seca" é significativa e ambos os mecanismos de transferência de calor são importantes.

Visualmente duas sequências de regime de escoamento, que dependem da taxa de injeção de refrigerante, podem ser observadas: uma para taxa de inundação alta e outra para taxa de inundação baixa (FIGURA II - 8) (18), (19).

Para taxa de inundação alta, o título nas vizinhanças do ponto de remolhamento é baixo e ocorre um regime de escoamento anular invertido. Quando a velocidade do vapor do anulo atinge um valor crítico o núcleo líquido se rompe dando origem a que o escoamento com gotículas dispersas apareça.

Para taxa de inundação baixa, o título nas proximidades da frente de molhamento será alto e um regime de escoamento anular ascendente prevalece imediatamente atrás da frente de molhamento.

Andrèoni e Courtaud (18) (20) ressaltaram a similaridade do primeiro caso com DNB-Departure from Nucleate Boiling- que é um tipo de crise de ebulição que ocorre nos escoamentos subresfriados ou de baixo título. O segundo caso deveria corresponder a crise de ebulição por secagem (dryout).

Curvas típicas simplificadas da temperatura do revestimento e do coeficiente de transferência de calor obtidas pa

ra barras elétricamente aquecidas constituem as FIGURAS II-9 e II-10. Os diferentes segmentos da curva do coeficiente de transferência de calor foram traçados de acordo com os regimes de escoamento bifásico e de transferência de calor apresentados na FIGURA II-7.

O grau de entendimento dos mecanismo básicos do remolhamento é incerto pois não há uma teoria consistente a este respeito. Além disso, medidas experimentais precisas da temperatura de remolhamento, obtidas através de simulação, são difíceis uma vez que o fenômeno é altamente transitório e envolve gradientes de temperatura muito acentuados que fazem com que a medida de temperatura no ponto de remolhamento seja muito difícil de se detetar. Essas dificuldades evidenciam-se quando se consulta a literatura técnica relativa ao remolhamento, os valores para a temperatura de remolhamento e os do coeficiente de transferência de calor na região da frente de remolhamento encontrados pelos vários pesquisadores.

2.6 - ESTUDOS EXPERIMENTAIS

O processo básico de remolhamento que ocorre no núcleo de um reator é similar ao que ocorre para um tubo aquecido. A diferença entre ambos é que o primeiro deve incluir, em sua análise final, a complexibilidade provocada pelas paredes aquecidas, pelo calor de decaimento, escoamento em subcanais, distribuição não uniforme dos fluxos de calor radial e axial, desequilíbrio de entalpia e obstruções ao fluxo do refrigerante causadas pelos equipamentos que sustentam as

barras combustíveis.

O número de estudos experimentais que investigam os mecanismos físicos que envolvem o processo de remolhamento de uma superfície aquecida a uma temperatura superior a de saturação da água aumentou substancialmente nos últimos 20 anos. Os laboratórios governamentais e os fabricantes de reatores nucleares é que dirigem e incentivam os programas experimentais destinados a um maior e melhor entendimento dos fenômenos de transferência de calor que ocorrem durante o remolhamento.

As experiências são realizadas com tubos formando um único canal (geometria tubular) de escoamento, tubos formando ânulos, e feixes de barras simulando com grande aproximação o conjunto de barras combustíveis nucleares, todos eletricamente aquecidos.

O objetivo das experiências em geometria tubular é obter conhecimentos básicos dos fenômenos de transferência de calor e de escoamento do fluido refrigerante sob condições experimentais bem definidas.

Os testes com feixes têm a finalidade de gerar dados de transferência de calor e escoamento de fluido necessários a análise de segurança de reatores.

Como as características de todos os componentes do

circuito primário afetam o processo da reinundação, em alguns experimentos, chega-se a simular um circuito primário completo.

A capacidade calorífica das barras combustíveis ou das barras usadas para simulação é um parâmetro importante uma vez que grande parte do calor armazenado nas barras é liberado para o refrigerante na fase do remolhamento (REWETTING). A maior parte das experiências efetuadas com feixes utilizam aquecimento indireto (barras aquecedores tipo filamento) que possuem capacidade calorífica compatível com a de uma barra combustível verdadeira. Há experiências, também, que são efetuadas com tubos de paredes finas e diretamente aquecidos.

Os programas experimentais realizados com equipamentos que simulam um sistema primário completo mostram, sob certas condições, que oscilações termo-hidrodinâmicas violentas ocorrem durante a fase inicial do processo de reinundação. Elas se manifestam como oscilações do nível d'água no espaço anular e na seção de testes aquecida. Apresentam-se, também, como oscilações da taxa de fluxo de injeção nas seções de testes. (23)

Experiências de reinundação em regime estacionário também são realizadas. O objetivo delas é estabelecer o mínimo de líquido injetado na seção de testes capaz de fornecer refrigeração por longo tempo em regime estacionário.

Para uma determinada geometria e distribuição radial de potência, os parâmetros que necessitam ser investigados são: a velocidade de injeção ou taxa de reinundação, a temperatura da água de refrigeração, a pressão do sistema, a temperatura inicial da barra combustível e o nível de potência.

Concluindo, apresenta-se na tabela 2.1 o levantamento dos trabalhos experimentais desenvolvidos por vários laboratórios e pesquisadores, e que fazem parte da literatura publicada sobre reinundação. Nesse levantamento estão salientadas as características principais de cada experiência, sempre que foi possível obtê-las, bem como sua referência bibliográfica.

AUTOR	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	SEÇÃO DE TESTES	CONDIÇÕES DE MOLHAMENTO							COMENTÁRIOS	CONCLUSÕES			
			FORMA	REFRIGERANTE	TEMPERATURA SUP. DA PAREDE °C	TEMPERATURA DO REFRIG. °C	NUMEROS PRANDTL $T_w - T_c$	PRESSIONAMENTO bar	FLUXO DE CALOR W/cm^2			VAZÃO g/s	FRACAO DE VAZAO	
Ellison (1954) (24)		- anular (4,35m d.i. e 83,30m d.e.)							1 - 4	147-194				
McDonough, King, Klitch (1941) (25)	- tubo eletricamente aquecido													
Shiras, Picheiro, Blachar (1964) (26)	-tubo eletricamente aquecido colocado no interior de um cilindro de vidro (23,0m d.i.) -tubo eletricamente aquecido - feixe com 7 barras colocadas num cilindro de vidro (23,5m d.i.) e	-tubo SS (16m d.e., 366m de comprimento; 0,91m de espessura) -Tambor (16m d.e., 298m de comp., 0,91m de espessura) -tubo SS (16m d.e., 366m de comp., 0,91m de espessura)	Descen - dente	Água	93 - 93	20 - 93	< 80	1	< 7,3	< 9	2,3 - 18 g/s		- observação visual da fragmentação (metálica), movimento (frisco) e fluxo contrário de vapor	- remolhamento aumentado com o aumento do fluxo de massa
Romerio, Martins (1965/66) (27)	- tubo aquecido eletricamente colocado em vaso	- tubo de cobre (40m d.e.) - tubo SS (12,7m d.e.)	Ascen - dente	Água	275 - 500	80 - 98	< 20	1	< 30				- observação visual do secamento (dry out), pontos quentes (spots) e modelo analítico	
Bennett, Barrett, Moore (1966/67) (28)	- tubo aquecido eletricamente colocado num cilindro com vácuo de pressão (127m d.i.)	- tubo SS (12,7m d.e., 58cm de comprimento; 1,6m de espessura) - tubo Inconel 800 (12,7m d.e., 536 e 36cm de comp.)	Descen - dente	Água	235 - 475	sat.	0	7 - 70	< 1,2	4 - 18 g/s			- velocidade de frente de chama, estatística de temperatura de parede na qual a velocidade se torna independ.	- nenhum efeito do fluxo de massa
Bradfield (1967) (29)	- esfera em vaso	- esfera de cobre revestida com cromo (60m)	Submersa	Água	870	28 - 95	< 70	1	0				- curvas de ebulição dependentes do t	
Yamamoto (1968) (30)	- feixe de 16 barras em formação de quadrado (119 x 119mm)	- tubos SS (15m d.e., 150 e 250cm de comprimento; 1m de espessura)	Descen - dente (spray)	Água	250 - 600	20	80	1	< 4	83 - 417 g/s			- medida de velocidade de molhamento - modelo analítico	- remolhamento aumentado com a taxa de fluxo
Schlesker et al. (1968) (31)	- feixe de 37 barras em arranjo quadrado	- filamento Nichrome/WgO - tubo SS (14,7m d.e., comp. aquecido 0,91m; canal 19m)	Ascendente	Água	720 - 1374	38 - 70		atm		23 - 92 cm/s			- todos os experimentos da série RECHT são essencialmente realizados a taxa de remolhamento constante.	
Wicks, Baber Jr., Sawcuk (1969) (32)	- esfera em vaso	- esfera de tantalum	Em movimento	vódeo	< 985	300 - 450		1	0	150 - 250 cm/s			- temperatura de superfície - curva de ebulição - modelo analítico	
Walford (1969) (33)	- esfera em canal retangular de plástico	- esfera de níquel (6,35m)	Em movimento	Água	120 - 1000	20 - 95	< 80	1	0	50 - 175 cm/s			- observação visual de ebulição de transição - efeitos de oxid.	
Jacobson et al. (1969) (34)	- esfera em tubo de vidro (22cm d.i.)	- esfera SS (12,5m)	Ascendente	Água		12 - 50	< 90	1	0	0,4-2,7 cm/s			- medidas pirométricas da temperatura de superfície - observações visuais	
Bergles, Thompson Jr. (1970) (35)	- barras e torus em vaso	- tubo SS (12,7m d.e., 152 cm de comprimento) - tubo de cobre (12,7m d.e., 81cm de comprimento)	Descendente + Submersa	Freon + Nitrogênio Água	545 - 594	sat.	0	1					- testes em estado estacionário e transiente - influência da superfície do material	
Stevens, Bullock, O'Keefe, Cox (1970) (36)	- esfera em canal retangular 10 x 31cm	- esfera de cobre revestida com prata (19m)	Em movimento	Água	146 - 453	24 - 34	< 74	1	0	300 - 600 cm/s			- observação visual do mecanismo de ebulição	
Duncan, Leonard (1970) (37)	- feixe de 49 barras eletricamente aquecidas	- tubos SS (14,5m d.e., 366 cm de comp., 2,5m de espessura)	Ascendente + Descendente	Água	463 - 1022	64	34	1	< 4	150 - 320 g/s			- estado dos coeficientes de transferência de calor - modelo analítico	
Moore, Grubb (1974) (38)	- feixe de 37 barras em arranjo quadrado	- filamento Nichrome/WgO - tubo SS (14,5m d.e., comprimento aquecido 1,93m; canal 19m)	Ascendente	Água	315 - 1093	38 - 93		atm		1,1-10,3 cm/s				

TABELA II - 1 : LEVANTAMENTO DOS TRABALHOS EXPERIMENTAIS DESENVOLVIDOS NA ÁREA DE REMOLHAMENTO

AUTOR	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	SEÇÃO DE TESTES	CONDIÇÕES DE MANTIMENTO						VALORES	COMENTÁRIOS	CONCLUSÕES
			TEMPERATURA DO MANTIMENTO, T ₀ - °C	TEMPERATURA DO MANTIMENTO, T ₁ - °C	UMIDADE RELATIVA, %	TEMPO DE MANTIMENTO, h	TEMPO DE MANTIMENTO, h	TEMPO DE MANTIMENTO, h			
Pim (1970) (33)	- Filme de 37 barras em arranjo quadrado	- Filamento: Eloxal/AgO - tubo 22 (14,7mm d.e.); comprimento 1,83 m (2x0,915m)	310 - 330	38		24	1	4,5 cm/s	- comparação entre AgO e IrO ₂		
Jensen (1970) (34)	- arranjo 3 x 3 em cilindro de vidro	- Filamento: /AgO - tubo 22 (14,7mm d.e.); comprimento 1,83 m (2x0,915m)	310 - 330	24 - 33				1,7 - 23,6 cm/s	- testes de visualização		
Woolfson, Moseley (1970) (35)	- tubo 22 (14,7mm d.e.); arranjo de comp. 1m de espessura	- tubo 22 (14,7mm d.e.); arranjo de comp. 1m de espessura	300 - 330	10 - 76	< 80		1	0,25 - 2,5 m/s	- testes à taxa de movimento constante	- movimento mínimo de transferência com a taxa de variação	
Willow (1970) (36)	- arranjo 3 x 3	- tubo 22 (14,7mm d.e.); arranjo de comp. 1m de espessura							- determinação de velocidade de frente de chama		
Wagner, Moseley (1971) (37)	- Filme de 49 barras	- tubo 22 (14,7mm d.e.); arranjo de comp. 1m de espessura	449 - 323	26	66		1 - 24	159 - 238 g/s	- transferência de calor em estado estacionário de pressão		
Chen, Chertkov (1971) (38)	- Cilindro em vaso	- arranjo de comp. 1m de espessura	437 - 323		10 - 110		1 - 6,2	5,1 - 61,7 cm/s	- comparação entre IrO ₂ e Ir		
Yano (1971) (39)	- arranjo em vaso de vidro (40mm d.i.; 36mm de altura)	- arranjo de comp. 1m de espessura	28 - 89	20 - 160	< 80		1		- curvas de extinção		
Yano (1971) (40)	- arranjo em vaso de vidro (40mm d.i.; 36mm de altura)	- arranjo de comp. 1m de espessura	7 - 28	47,5 (est.)	0		1	0	- influência da oxidação		
Yano (1971) (41)	- arranjo em vaso de vidro (40mm d.i.; 36mm de altura)	- arranjo de comp. 1m de espessura	149 - 246	24 - 60	< 76		1	0	- observações visuais de extinção em chama		
Yano (1971) (42)	- arranjo em vaso de vidro (40mm d.i.; 36mm de altura)	- arranjo de comp. 1m de espessura	8 - 25	47,5 (est.)	0		1	0	- observações visuais		
Yano (1971) (43)	- arranjo em vaso de vidro (40mm d.i.; 36mm de altura)	- arranjo de comp. 1m de espessura	260 - 330	24 - 77	76		1	6	- curvas de extinção		
Yano (1971) (44)	- Filme de 18 barras (41mm comp.)	- tubo 22 (14,7mm d.e.); arranjo de comp. 1m de espessura	149 - 656	4 - 71	< 94		1 - 2,5	0,65-2,6 m/s	- influência de material de suporte	- coeficiente de transferência de calor	
Yano (1971) (45)	- Filme de 248 barras	- tubo 22 (14,7mm d.e.); arranjo de comp. 1m de espessura	190 - 600	25 - 65	1		1 - 6	< 8	- tempo de transferência de calor	- tempo de quench	

TABELA II - 1 : (CONTINUAÇÃO)

AUTOR	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	SEÇÃO DE TESTES	CONDIÇÕES DE MOLDAMENTO								COMENTÁRIOS	CONCLUSÃO	
			TUBO	APLICAÇÃO - MATE	TEMPERATURA		VELOCIDADE	PLANO DE MOLDAGEM	VALOR	FRACÃO DE VAZIO			
					°C	°C							
1973													
Piercer (1973) (61)													
Schneider Chaves (1973) (62)	- tubular	- tubo de Inconel 625 (9,4 mm de espessura; 13,8mm d.o.; 2,90% de compressão)	Acendedor + Resistor	Água	500 - 700	~ 90		1:3:5		4,0; 0,5; 13,0			- Descrever a simulação do volume do ejetor - - oscilações observadas
FLCOW (1973) (63)	- tubo 10 x 10	- tubo SS, aquecimento indireto	Acendedor + Resistor	Água	500 - 700		82 - 110	1,5 - 4,5	< 10 (000)	900 - 2210 g/s			- estudo da dependência temporal do crescimento do produto
Com. Meta. Nucleo, Schneider (1973) (64)	- Anulo (vidro) com tubo aquecido no ejetor (22 x 33mm d.i.)	- tubo SS e Cu (13mm d.o.)	Acendedor	Água	600 - 800			1		1 - 10 mm/s			- estudo de remolhamen- to - análise analítica - observações visuais
Meta. Nucleo, Schneider (1974) (65)													
Meta. Nucleo, Williams (1974) (66)													
Jacobson, Courtes, Torrance (1974) (67)	- tubular	- tubo de Inconel (2,23mm de espessura; 13,7mm d.o.; 3,27% comp. aquecido)	Acendedor	Água	300 - 600 - 900	20; 50; 80		1:3:6		0,0; 7,0; 15,0; 17,0			
White, Duffey (1974) (68)	- anular	- tubo SS (10,7mm d.o.; 19,3 mm d.o.; 8,45% de comp. aquecido)	Acendedor	Água	400 - 700 - 1000	20; 60		etc		1,1; 10,0			- seção de testes em um reator em o desenvolvimento - seção de testes variável - oscilações observadas - comparação com um tipo de reação química
Westphalen de FRANCIS, Mariani de (1975) (69)													
Pignatelli, Sueli (1975) (70)	- tubo - Anulo, tubo aquecido de 411mm	- Ar pressurizado em tubo - - rindo dióxido (13,7mm d.o. - - 50% de compressão) - tubo Ar e SS pressurizado - com dióxido de titânio (10,7mm d.o.; 50% de comp.)	Acendedor + Resistor	Água	< 700	15	80	1		0,5 - 15			- estudos de efeitos da superfície
Yu (1975) (71)	- tubo	- tubo SS (10,7mm d.o.; 50% de compressão)	Acendedor	Água	300 - 700	0 - 90		1 - 14,0					- influência da pressão no remolamento
Meta. Nucleo (1975) (72)	- ejetor em vazio	- ejetor de Cu e SS	Substância	Água	600		< 60	1	0				- estudo de subestrutura e de material
Mariani (1975) (73)	- tubo com 64 buracos	- tubo de Inconel (12,25 x 13,7mm d.o.; 30% de compressão). Aquecimento indireto.	Acendedor	Água	470 - 900			1 - 25		3 - 15 g/s			- influência da pressão

TABELA II - 1 : (CONTINUAÇÃO)

AUTOR	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	SEÇÃO DE TESTES	CONDIÇÕES DE BOLHAMENTO								COMENTÁRIOS	CONCLUSÕES	
			FORMA	REPRISAS ANTE	TEMPERATURA DE SATUR. DO VAPOR. °C	TEMPERATURA DO BOLHAM. °C	DEPRESSÃO. T _v - T _s K	PRESSÃO bar	FLUXO DE CALOR W/cm ²	VEZÃO			FRAÇÃO DE VAPOR
Farmer (1975) (72)	- tubo refrigerado internamente	- tubo SS (16mm d.i.)	Acidental	Esqa	300 - 600		0 - 70	1		< 200 g/s		- estudo da velocidade de frente de câmara para diversos parâmetros	
Andrzejewski (1975) (20)													
Jansen, Kervinen (1975) (73)	- tubular	- tubo de Inconel n°750 (12,6mm d.e.; 10,95mm d.i.; 5,56m comprimento encurtado)	Acidental	Esqa	437 - 743						10 - 137 cm/s		
Lauer (1974) (74)	- barras e esferas em tubo grande de pressão (250mm d.i.)	- barra SS (45mm dia; 90mm de comprimento) - esferas SS e de Ag (45mm de diâmetro)	Acidental	Esqa	300 - 900		0 - 127	1 - 5	0		1,4 - 23 cm/s	- influência do sub-resfriamento do fluido - influência da superfície do material - observações visuais - modelo analítico	
Thomas (1977) (75)	- tubo eletricamente aquecido colocado no interior de cilindro que funciona como vaso de pressão	- tubo SS (15,8mm d.e.; 81cm de comprimento)	Acidental	Esqa	170 - 610	sat	0	1 - 40			4 - 30 cm/s	- influência de alta pressão - influência de depósitos na superfície	
Ralph, Sanderson, Ward (1977)	- tubo de paredes finas refrigerado internamente (75mm d.e.; 24 cm de comprimento)	- tubo de cobre niquelado (9,5mm d.i.) aquecimento indireto	Acidental Dependente	Esqa	< 600		10 - 30	2 - 3			47 - 2170 kg/m ² .s	- estudo de transferência de calor sob dryout	

TABELA II - 1 : (CONTINUAÇÃO)

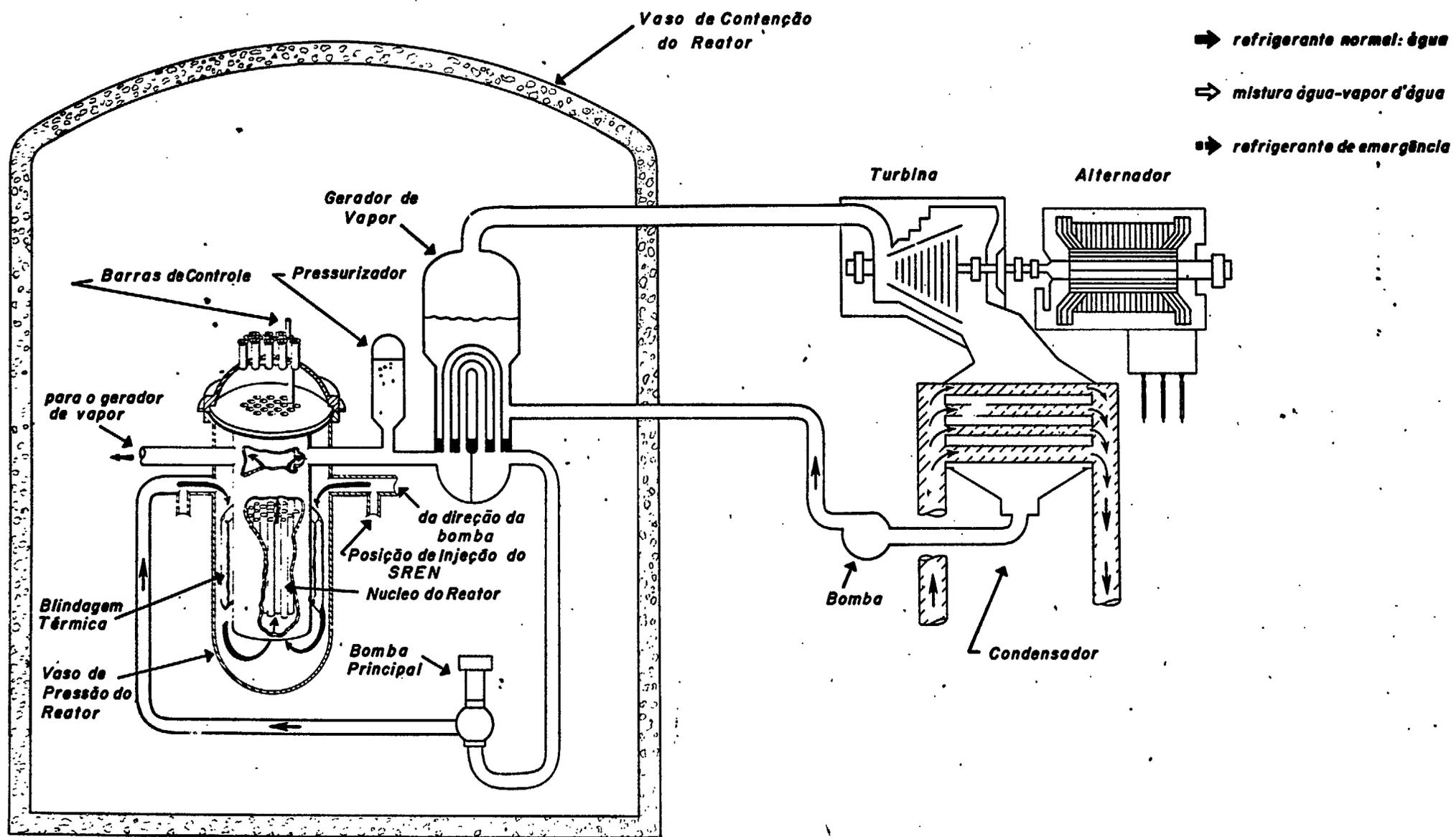


FIGURA II - 1: ESQUEMA DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA CENTRAL NUCLEAR TIPO PWR

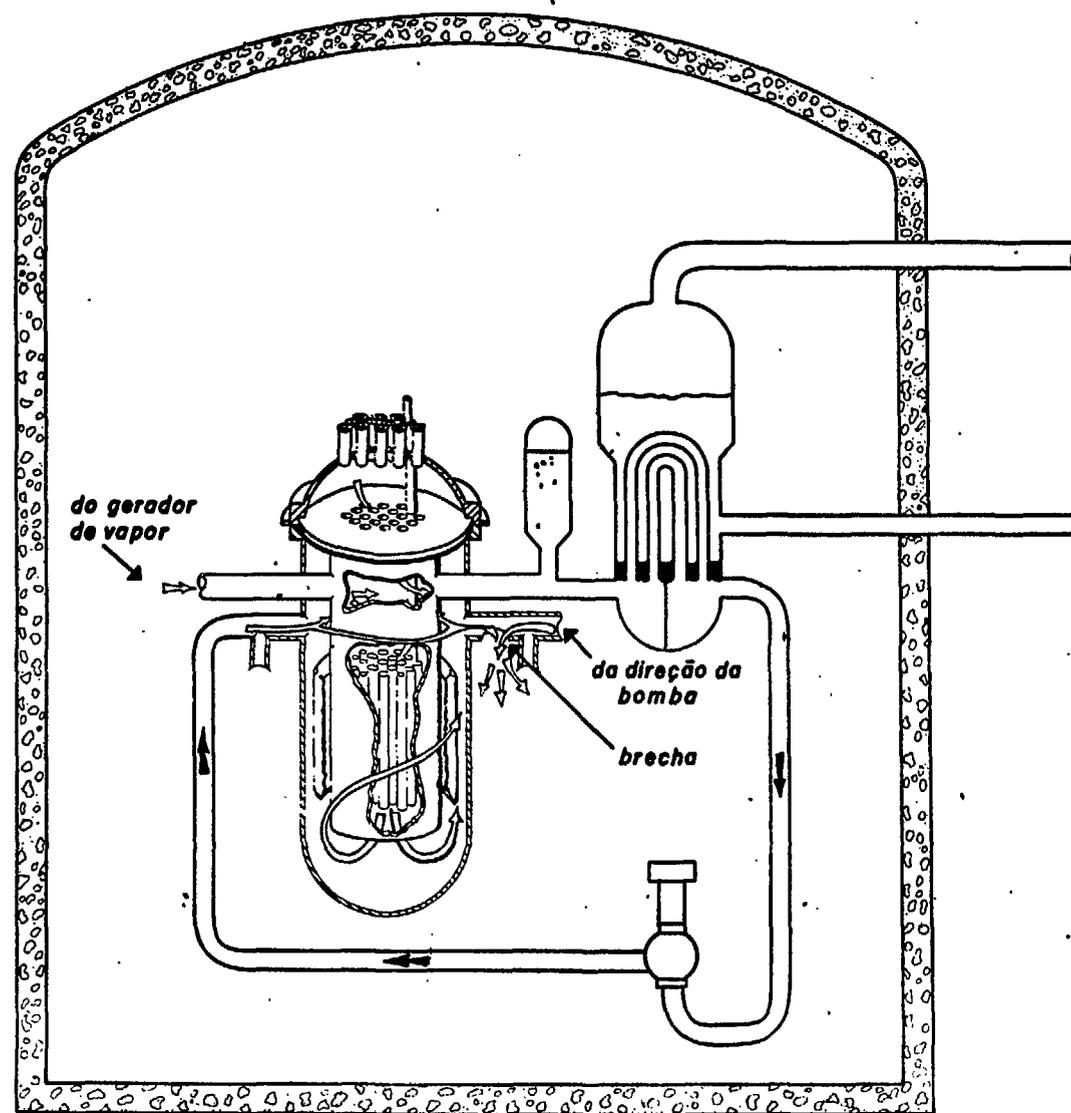
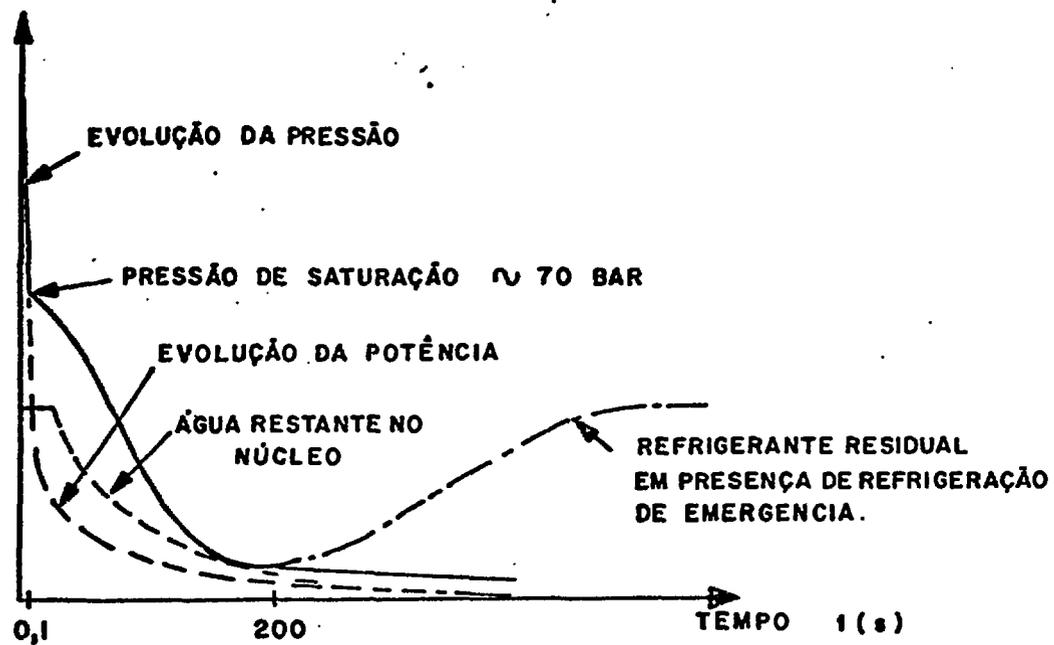
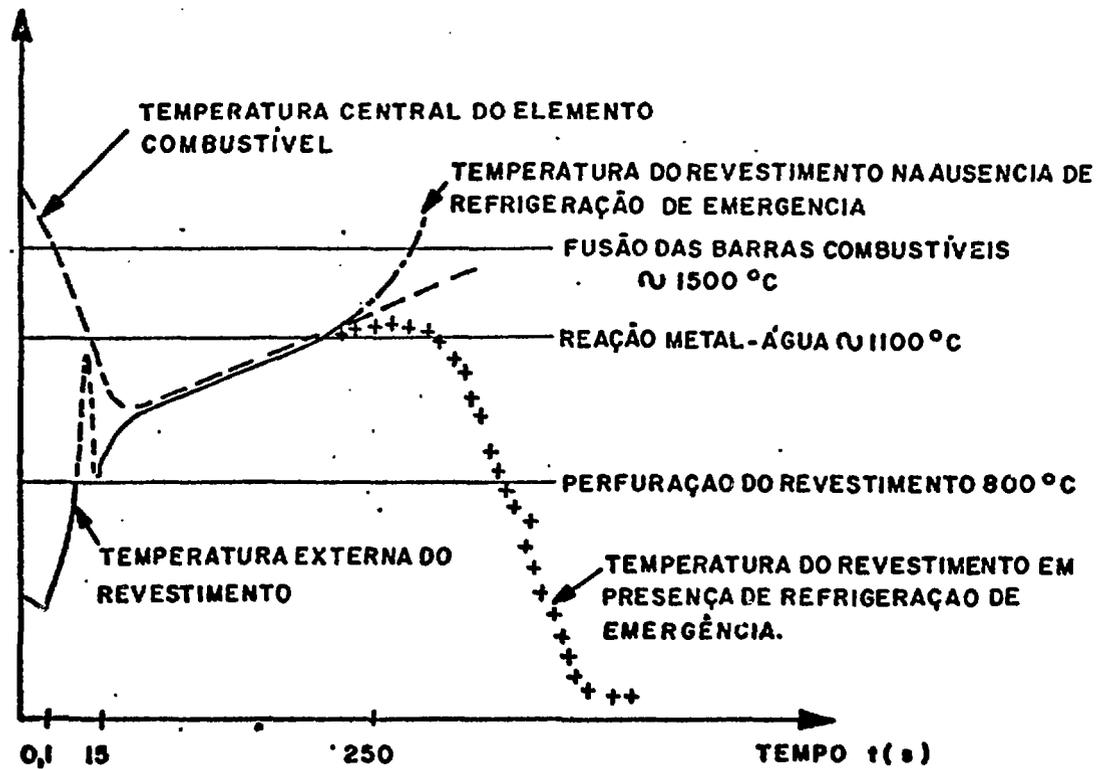


FIGURA II - 2: DIREÇÃO DE ESCOAMENTO DO FLUIDO REFRIGERANTE APÓS A RUPTURA

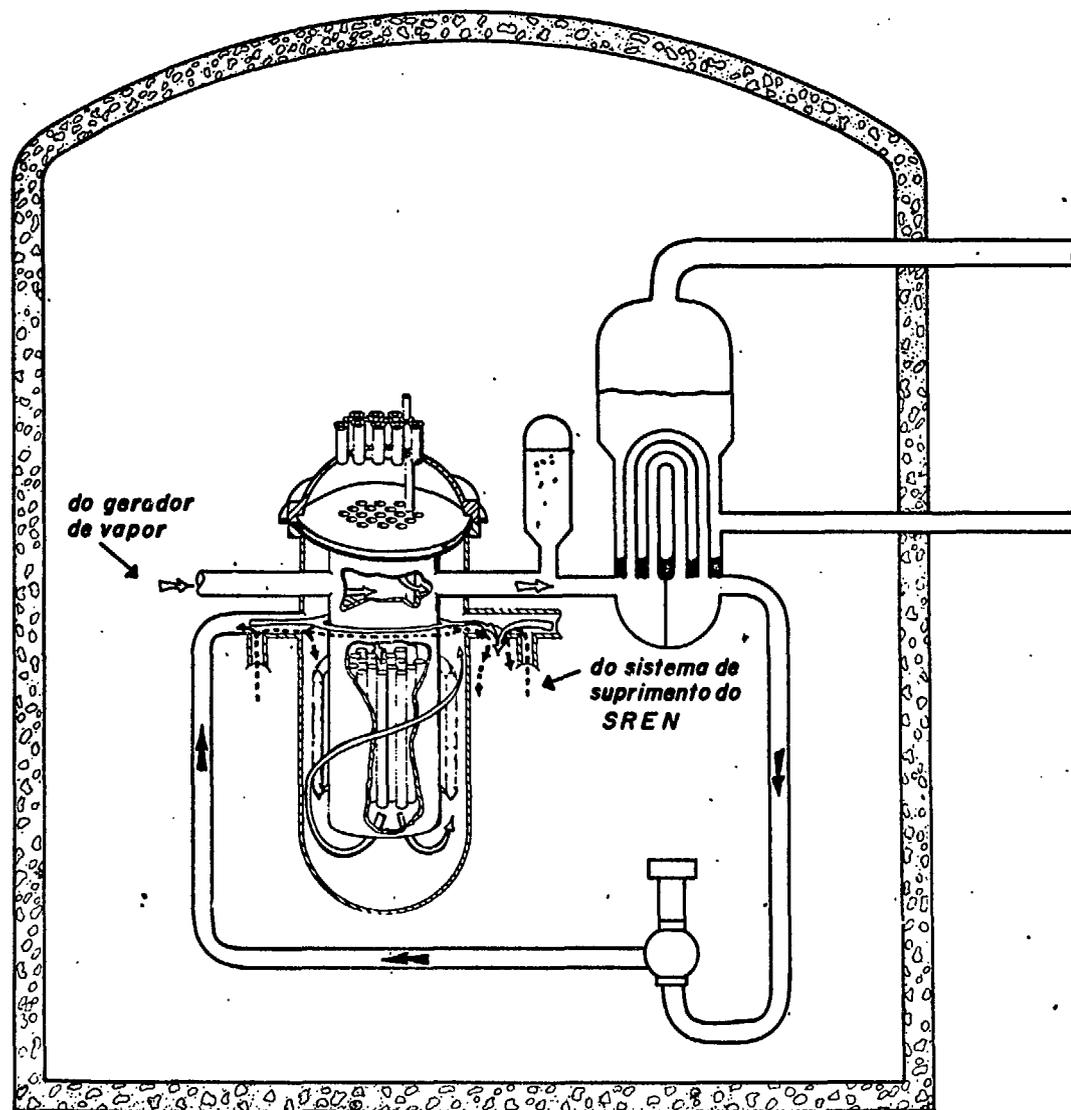


EVOLUÇÃO DA PRESSÃO E DO VOLUME DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO NO NÚCLEO



EVOLUÇÃO DAS DIFERENTES TEMPERATURAS NO NÚCLEO

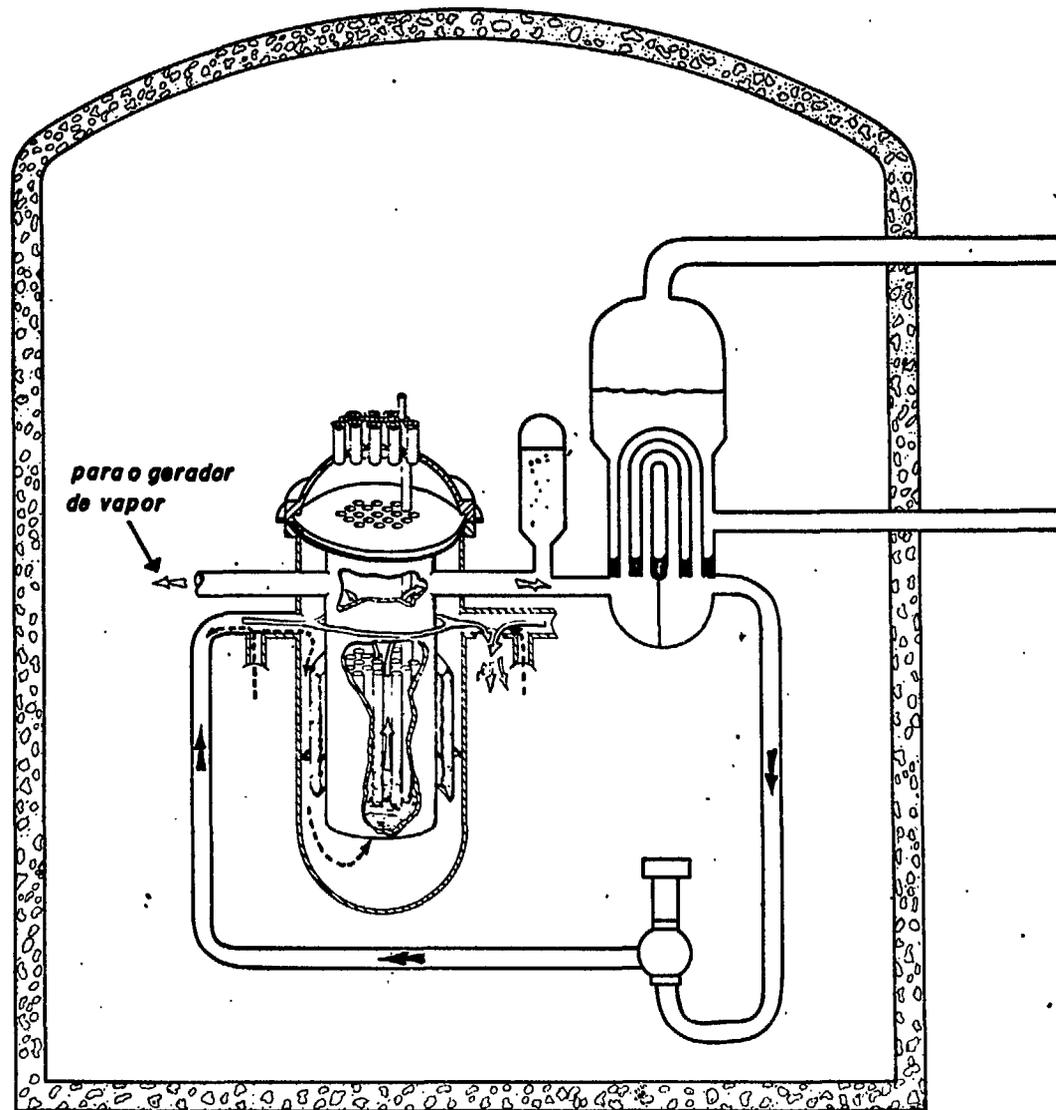
FIGURA II-3: RESPOSTA DO NÚCLEO DE UM REATOR P.W.R.
APÓS A RUPTURA DA PERNA FRIA



- ➡ refrigerante normal: água
- ➡ mistura água-vapor d'água
- ➡ refrigerante de emergência

FIGURA II - 4:

FASE DE DECOMPRESSÃO E INÍCIO DE ATIVAÇÃO DO SREN



➔ refrigerante normal: água

➔ mistura água-vapor d'água

➔ refrigerante de emergência

FIGURA II - 5: DIREÇÃO DE ESCOAMENTO DO FLUIDO REFRIGERANTE DURANTE O REMOIHAMENTO

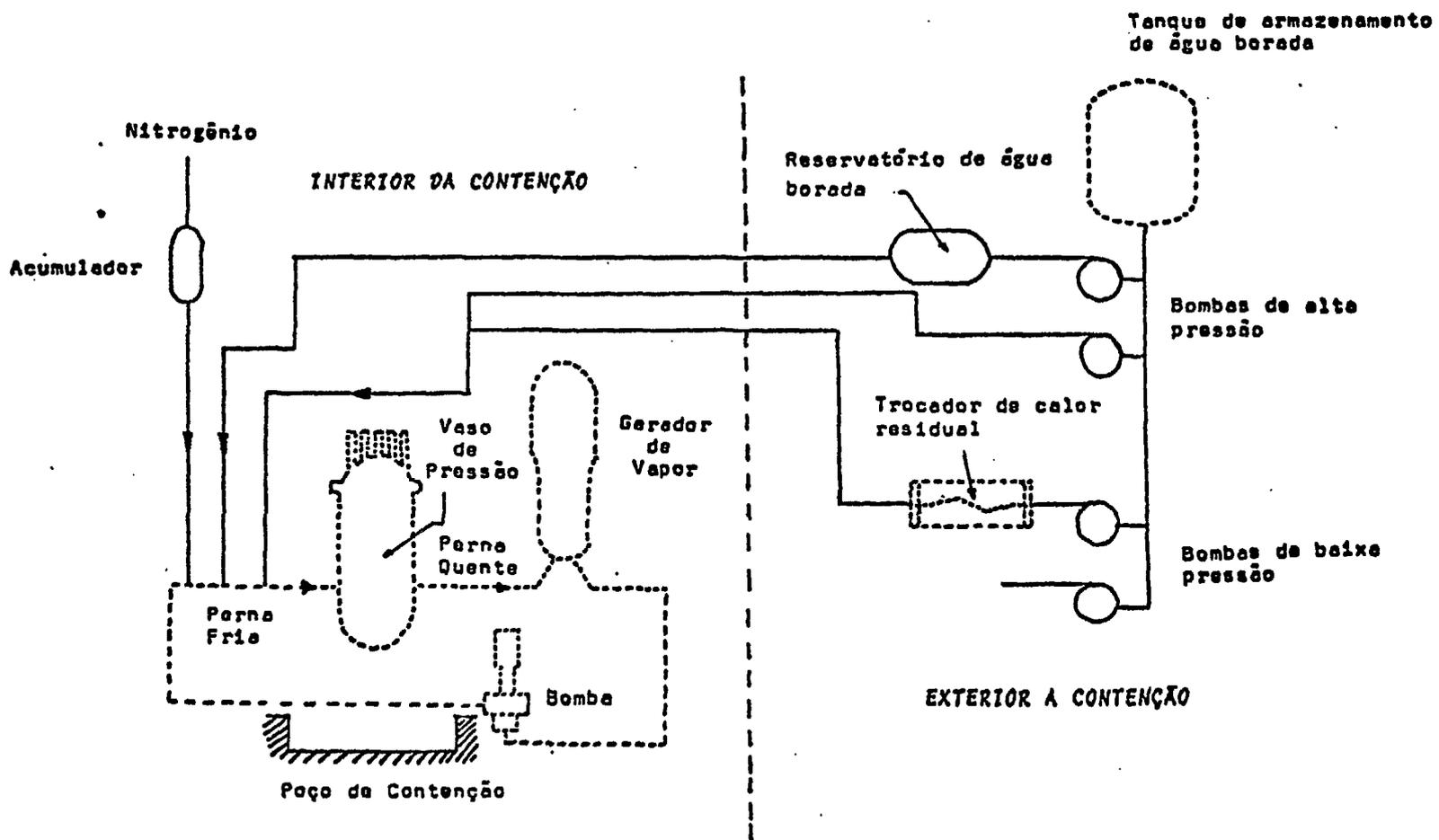


FIGURA II-6: SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE EMERGÊNCIA DO NÚCLEO

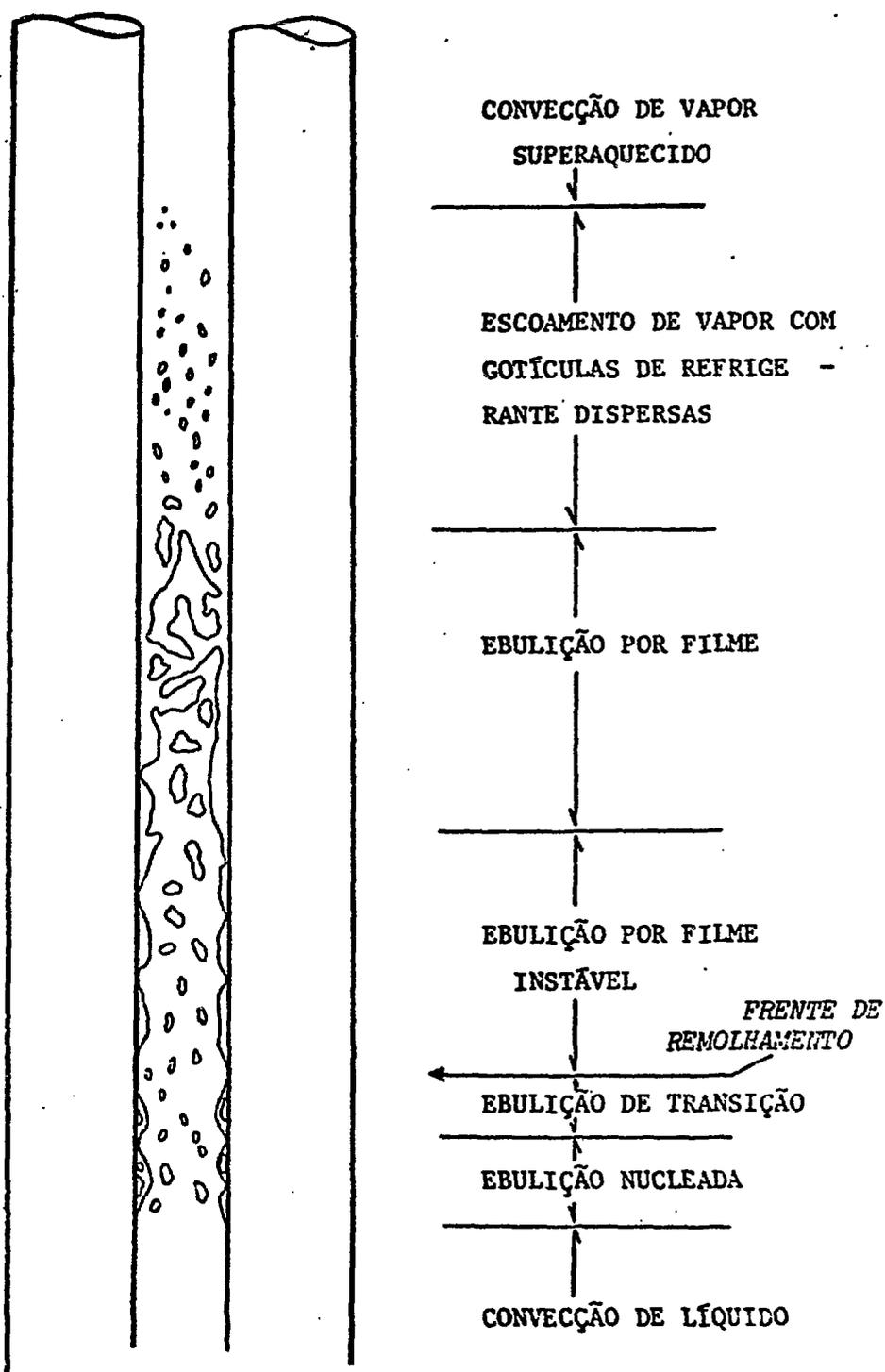
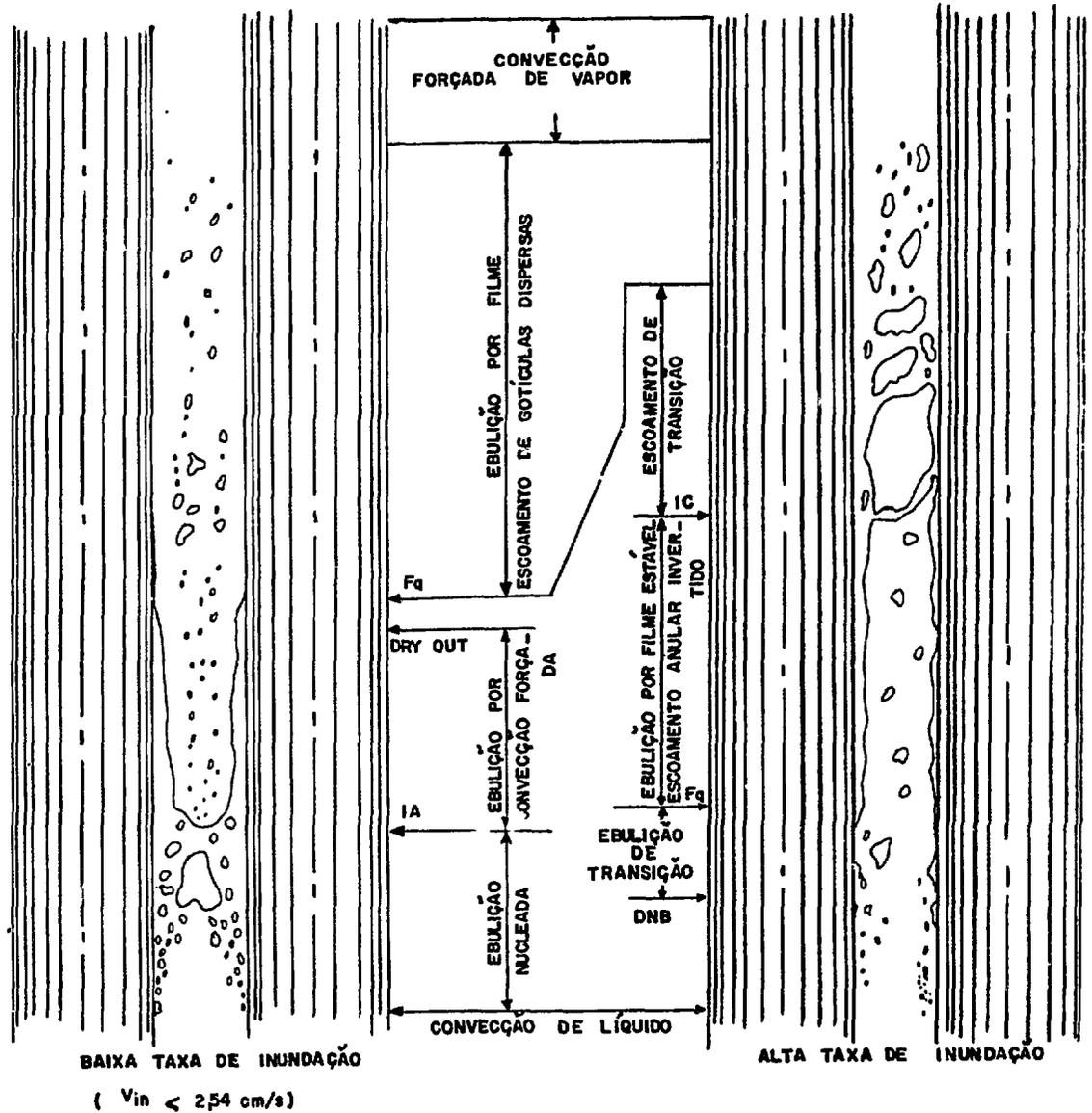
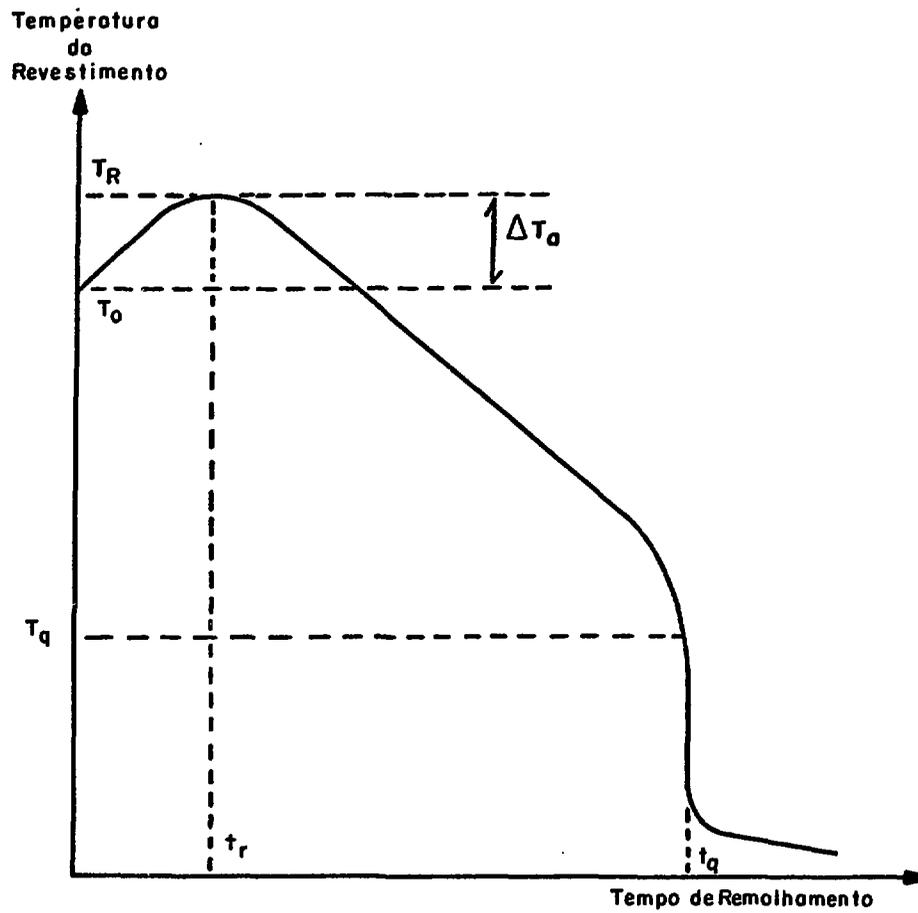


FIGURA II-7: RÉGIMES DE ESCOAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR OBSERVADOS



- Fq - FRETE DE REMOLHAMENTO
- IE - INÍCIO DE EBULIÇÃO
- IC - INÍCIO DO CARREGAMENTO
- IA - INÍCIO DO ESCOAMENTO ANULAR ASCENDENTE

FIGURA II-8: REGIMES DE ESCOAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR OBSERVADOS PARA TAXAS DE INUNDAÇÃO VARIÁVEIS(19)



- T_R Temperatura de Retorno
- T_0 Temperatura Inicial
- T_q Temperatura de Remolhamento
- T_a Aumento de Temperatura
- t_r Tempo de Retorno
- t_q Tempo de Remolhamento

FIGURA II-9: COMPORTAMENTO TÍPICO DA TEMPERATURA DO REVESTIMENTO PARA UMA DADA COTA

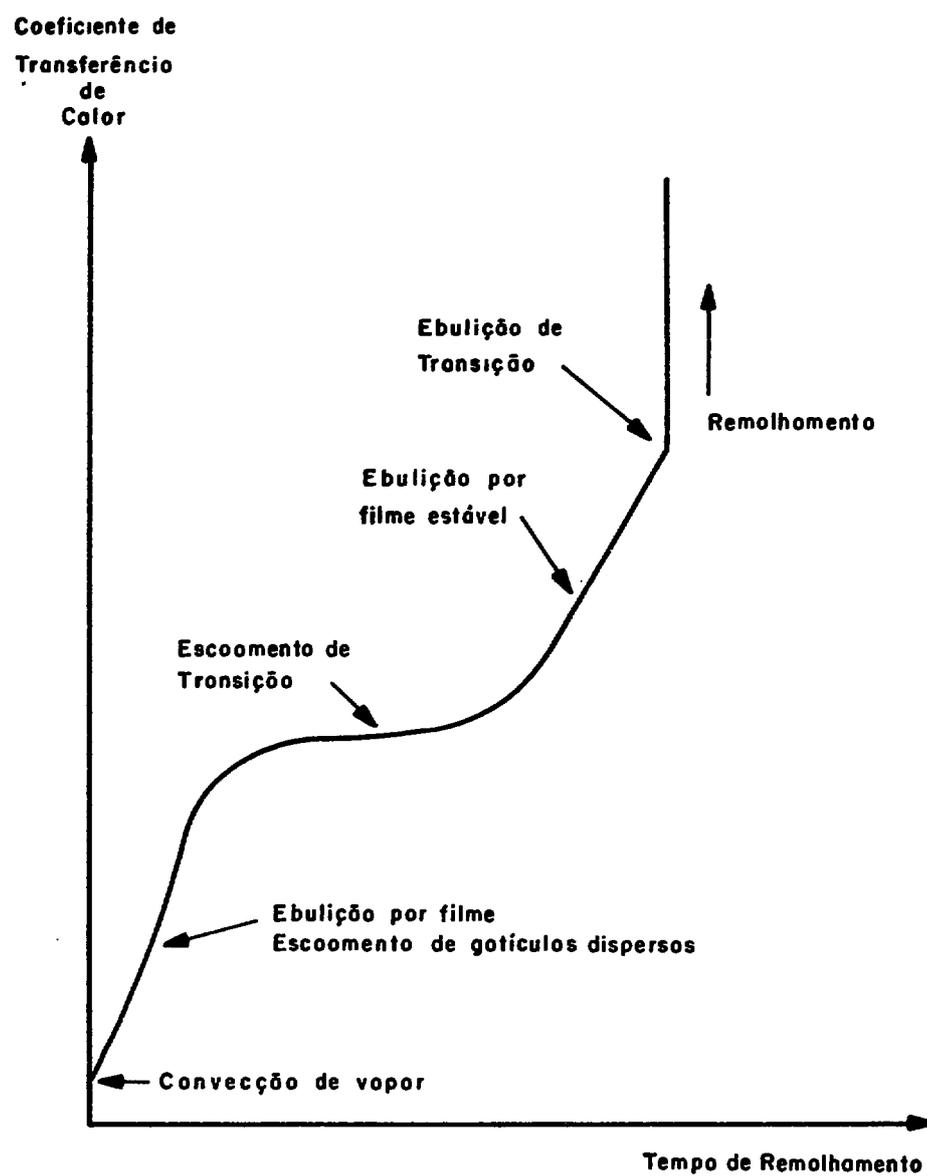


FIGURA II-10: PERFIL ESQUEMÁTICO DA VARIAÇÃO DO
• COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE
DE CALOR COM O TEMPO

CAPÍTULO III

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

3.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita a descrição do dispositivo experimental (circuito suporte nº1 CS1) que sofreu modificações em seu projeto inicial. Incluiu-se nele, também, a descrição da reforma do CS1, a descrição dos testes de aferição e desempenho do circuito, bem como seu processo operatório.

3.2 - DESCRIÇÃO DO CIRCUITO

O dispositivo de testes utilizado neste trabalho foi o Circuito Suporte Nº1 (CS1) do Laboratório de Termohidráulica, modificado, já que originalmente ele fora projetado para a realização de testes tais como transferência de calor, perda de pressão e fluxo crítico de calor em escoamento monofásico (líquido) ou bifásico, em regime permanente e escoamento turbulento, em condições que diferem substancialmente das que se apresentam neste trabalho.

3.2.1 CIRCUITO SUPORTE Nº1 (CS1)

Na FIGURA III-1, é apresentado o fluxograma original do CS1 que consta essencialmente de um filtro, bomba centrífuga, medidor de vazão, pré-aquecedor, seção de testes com medidas de temperatura e pressão à entrada e à saída, visor e

um condensador de mistura.

A natureza dos experimentos deste trabalho implicaram na necessidade de alterações. Elas foram realizadas no decorrer dos testes de comissionamento e o fluxograma do circuito passou a ser o apresentado na FIGURA III - 2. Comparado com o da FIGURA III - 1, nota-se as seguintes modificações:

- Eliminação do ramo de condensação da seção de testes, para evitar remolhamento descendente.
- Colocação de um rotâmetro em paralelo com o já existente, visando cobrir a faixa de pequenas vazões ($< 20 \text{ l/h}$).
- Colocação de desvio no pré-aquecedor, permitindo sua isolação, para evitar erros na contagem do tempo, devido a acumulos de ar em sua extremidade superior.
- Instalação de válvula de isolação motorizada à entrada da seção de testes, visando o pré-aquecimento da seção de testes a seco.
- Instalação de ramo de drenagem à entrada da seção de testes para o esvaziamento da seção no início de cada teste e na regulagem prévia da vazão.
- Eliminação do visor e substituição por um reci-

- comprimento total	1200 mm
- comprimento aquecido	1000 mm
- diâmetro externo	8 mm
- diâmetro interno	6 mm
- quantidade de termopares de parede	4

A extremidade superior da seção de testes é fixada por meio de uma peça rosqueada num flange, que é, por sua vez, isolada térmica e eletricamente de um segundo flange fixado à estrutura de sustentação, por um disco de "teflon".

A extremidade inferior é isolada do mesmo modo, mas o segundo flange não é fixado à estrutura. Um tubo rosqueado na parte inferior deste flange é livre de deslocar verticalmente através de um orifício na estrutura. Quatro molas, dispostas simetricamente mantêm a seção de testes sempre sob tração evitando flambagem por efeito de dilatação térmica.

Na seção de testes, em pontos localizados, respectivamente, a 150 mm, 200 mm, 600 mm e 1030 mm do flange inferior foram colocados quatro termopares, numerados de T_1 a T_4 no sentido ascendente.

A seção de testes, em alguns experimentos, é revestida por um isolamento térmico destinado a impedir que ocorram elevadas perdas térmicas. Este revestimento é constituído essencialmente por uma camada de lã de vidro compactada e fixada em torno da STT por braçadeiras.

3.2.2.2 - Seção de Testes Anular (STA)

A seção de testes anular, que se destina a experiências de acompanhamento visual do fenômeno da reinundação, é apresentada na FIGURA III-4.

A STA é constituída por um tubo de seção circular, de aço inoxidável "SANDVIK 316 L". Às extremidades desse tubo foi soldado um tubo de cobre cujas dimensões são idênticas ao de aço inoxidável (d.i., e d.e.). Em cada extremidade o comprimento do tubo de cobre é de 400 mm e o comprimento aquecido da STA é só a parte de aço pois a de cobre funciona como conector (resistividade (ρ) à 500 °C: $\rho_{Cu}=0,02$ ohms.mm²/m e $\rho_{aço}=1,03$ ohms.mm²/m).

Envolvendo o tubo de aço-cobre, com a finalidade de obter o ânulo, foi colocado um tubo de vidro "pyrex". Esse dispositivo fornece uma área anular de escoamento que é mantida constante devido a colocação de 2 espessadores que permitem a passagem do refrigerante e que se localizam na emenda dos tubos de aço e cobre.

O acesso do refrigerante ao ânulo é feito através de

dispositivo especial projetado para esse fim. Esse dispositivo serve também para fixar a extremidade inferior dessa seção de testes, enquanto que a superior é fixada através de um apoio para o vidro.

A STA tem as seguintes dimensões:

- comprimento total	1600 mm
- comprimento aquecido	800 mm
- diâmetro externo (tubo de aço/cobre)	8 mm
- diâmetro interno (tubo de aço/cobre)	6 mm
- diâmetro externo (vidro)	18,6 mm
- diâmetro interno (vidro)	12,5 mm
- área anular de escoamento de refrigerante	72,5 mm ²
- quantidade de termopares de parede	3

Em pontos localizados, respectivamente a 0mm, 400mm e 800mm, em relação ao comprimento aquecido, foram fixados 3 termopares, denominados T_1 , T_2 e T_3 , a partir do inferior.

3.2.3 - Alimentação Elétrica

3.2.3.1 - Circuito Elétrico de Alimentação da Seção de Testes

Este sistema é constituído de um transformador trifásico "Toshiba", 45 KVA, 220 - 60/36, 4 volts, cujo secundário é conectado a um retificador de selênio, "Transmatic", mod RT - 33016/A, "trifásico controlado", 24V e 300 A. O retificador alimenta a seção de testes em corrente unidirecional pulsante com fator de "ripple" constante de 7,5%.

3.2.3.2 - Circuito Elétrico de Alimentação do Pré-Aquecedor

O sistema de alimentação elétrica do pré-aquecedor é do mesmo tipo do descrito no item anterior, com alimentação trifásica de 220 volts.

3.2.4 - Controle e Medidas

3.2.4.1 - Medidas de Vazão

As medidas de vazão na seção de testes são feitas, utilizando-se, alternativamente, dois rotâmetros LAMDA, de fabricação OMEL, ambos do tipo área variável. Um é com escala de 30 a 300 l/h, graduada de 5 l/h e o ajuste é feito atuando-se numa válvula "Dox" situada a sua montante. O outro é com escala de 2 a 20 l/h, graduado de 0,5 l/h, cujo ajuste de vazão é feito através de uma válvula já existente no próprio rotâmetro.

3.2.4.2 - Medidas de Pressão

Pressões estáticas são medidas a montante e a jusante da bomba, e na extremidade inferior da seção de testes. São utilizados manômetros tipo Bourdon: dois com escala de 0 a 8

Kgf/cm² é um de 0 a 5Kgf/cm², respectivamente, graduação de 0,1Kgf/cm².

3.2.4.3 - Medidas de Tensão Elétrica

A tensão aplicada à seção de testes foi medida em relação a trechos distintos. Para a STT são 5 trechos (FIGURA III - 5):

- tensão total, através de tomadas nos 2 conectores de alimentação.
- gradientes correspondentes ao posicionamento dos 4 termopares com relação ao terminal inferior.

No caso da STA os termopares são 3 e os trechos 4.

O primeiro valor foi controlado através de um voltímetro TRUE RMS Hewlett - Packard Mod 3403 C, fornecendo o valor quantitativo da tensão dissipada em cada teste e ainda por um registrador de pena Hewlett Packard Mod 3403C.

Os demais valores dos gradientes foram medidos através de dois registradores Hewlett - Packard Mod 7100 BM de 2 penas e uma especial para marcação de evento.

3.2.4.4 - Medidas de Temperatura

3.2.4.4.1 - Temperatura do Fluido na Entrada da Seção de Testes

Esta temperatura é medida utilizando-se termopar Ferro - Constantan, fabricação Honeywell. Um tubo de aço inoxidável introduzido até o eixo do escoamento aloja este termopar. Esta temperatura é captada por um registrador Hewlett - Packard modelo 7100 BM, equipado com módulo 17502 A, para termopar tipo J.

3.2.4.4.2 Temperaturas de Parede

As temperaturas de parede da seção de testes, são medidas por quatro termopares, de Chromel-Alumel tipo K, de fabricação ECIL S.A., com isolamento mineral, proteção de inonel (ϕ proteção 1,5 mm), faixa de utilização 0 °C a 1260 °C (0,000mV a +50,990mV) e potência termoelétrica: 4,04mV/100 °C. Esses termopares têm isolamento mineral BICC-Pyrotenax e são protegidos por uma capa metálica hermeticamente selada por um "plug" soldado na extremidade. Esta construção protege contra os desvios de forças eletromotrizes parasitas que provocam leituras incorretas e, além disso a pequena massa e a alta condutividade térmica do pó que constitui a isolamento mineral proporcionam ao termoelemento com isolamento mineral um tempo de resposta que é virtualmente igual ao de um termopar nu convencional de dimensões equivalentes. A fixação desses termopares é por solda-prata em sua extremidade, mantendo-se o contato entre a capa metálica e a seção de testes em cerca de 20 diâmetros externos do termopar, para minimizar erros de leitura devidos à condução térmica do corpo do termopar em contato com o ar à temperatura ambiente, como indicado na FIGURA III-6.

Os sinais destes termopares são lançados a dois regis-
tradores Hewlett-Packard Mod 7100 BM de duas penas. Estes re-
gistradores dispõem de pena de eventos, que nos testes em
questão foram conectados a botoeira de acionamento da válvula
motorizada de admissão de água da seção de testes.

O circuito que leva o sinal gerado em cada termopar
compõe-se de fios de compensação para termopar tipo K e de
junta fria por gelo fundente.

3.3 - TESTES INICIAIS DE AFERIÇÃO E DESEMPENHO

Instrumentos, tais como rotâmetros, manômetros, regis-
tradores de temperatura e voltímetros, permanecem aferidos por
um tempo relativamente longo. Dispositivos como os de medida
de temperatura de parede descalibram-se facilmente, devendo,
portanto, serem aferidos com maior frequência.

Além das aferições e calibrações que permitirão cor-
rigir os erros sistemáticos presentes nas medidas de parâmetros a
serem analisados, foi feita também uma estimativa de erros nas me-
didas com o objetivo de aquilatar o nível de erro envolvido em cada
grandeza medida ou calculada. Em decorrência, obtem-se um es-
quema para tratamento dos resultados brutos e posterior tabela-
mento com a indicação do grau de confiabilidade, imprescindível
à análise posterior dos fenômenos térmicos envolvidos.

3.3.1 - Aferição do Manômetro Situado na Entrada da Seção de Testes

O dispositivo utilizado para a aferição de manômetros é constituído de um tubo, no qual é conectado o medidor a ser aferido e um manômetro padrão de fabricação HAENNI, escala de 0 a 6 Kgf/cm², graduado de 0,05 Kgf/cm². Uma extremidade do tubo é bloqueada e a outra conectada a uma bomba volumétrica manual. Nestas condições, impõe-se determinada pressão aos manômetros e efetua-se duas leituras para cada pressão imposta.

Para todas as condições de pressão imposta, os dois manômetros em questão apresentam comportamento idêntico, devendo, portanto, ambos obedecerem à uma mesma curva de calibração que é mostrada na FIGURA III-7.

3.3.2 - Aferição dos Rotâmetros

Sua aferição é feita a partir de medidas de volume e tempo, realizadas em um recipiente calibrado. Para cada valor de vazão fixado no rotâmetro, são efetuadas 3 medidas e obtida a média dos valores encontrados. Com esta operação obtém-se a curva de calibração de tal instrumento que é mostrada na FIGURA III - 8.

3.3.3 - Calibração do Sistema de Medida de Temperatura do Líquido

Coloca-se o sensor imerso em gelo fundente (0°C). Após a estabilização dá pena do registrador correspondente a tal sensor, ajusta-se o registrador para marcar a temperatura 0°C, caso esteja deslocada, através do comando CALL ZERO. Concluída a primeira operação, coloca-se o sensor imerso em água ferven-

vente na condição de pressão local (98°C) e espera-se a estabilização. Se a pena se achar deslocada da posição 98°C, ajusta-se, através do comando CALL HIGHT do registrador, para que este indique a posição correta. Reiterando-se este processo chega-se a um ponto, em que não são necessários novos ajustes, estando o conjunto em questão calibrado..

As temperaturas de referência, 0°C e 98°C para esta operação, foram controladas por um termômetro digital com sonda de quartzo, adotado como padrão.

Medidas efetuadas com este conjunto só conterão erros intrinsecos das montagens.

3.3.4 - Calibração do Dispositivo de Tomada de Temperatura na Parede da Seção de Testes

Este dispositivo é calibrado inicialmente fora do circuito, tomando-se como referência uma temperatura bem determinada, como, por exemplo, a do gelo fundente.

Colocam-se todos os sensores imersos no gelo e registram-se suas medidas. Como a condição é isotérmica, pode-se ajustar todas as medidas subsequentes através das diferenças apresentadas.

Devido à necessidade de calibração frequente do conjunto, durante os testes, esta pode ser feita com os sensores instalados na própria seção, desde que se imponha uma mesma

temperatura, condição esta que se obtém com o auxílio do pré-aquecedor do sistema.

Foi também investigada a influência de forças eletromotrizes parasitas induzidas nos termopares por efeito de campo, pela inversão dos terminais de potência na seção de testes, chegando-se à conclusão de que estas são desprezíveis dentro da faixa de precisão dos instrumentos de medida.

3.3.5 - Teste de Isolamento Hidráulico e Elétrico do Circuito

Verifica-se a estanqueidade do circuito. Em seguida, efetua-se o teste elétrico, medindo-se a resistência de isolamento da seção de testes, para a qual é obtido um valor superior a 200 k Ω .

3.3.6 - Desempenho do Circuito

Verificada a não existência de vazamentos no circuito, o perfeito isolamento elétrico da seção de testes e a calibração da instrumentação procede-se aos testes pré-operatórios com o intuito de determinar o comportamento do circuito com relação a flutuações nas indicações de pressão, vazão de líquido e tempo de resposta dos sensores de temperatura.

Com o circuito cheio de água, sem circulação verifica-se que os medidores de temperatura indicam o mesmo valor, preconizando o seu bom funcionamento.

Em prosseguimento, dissipa-se potência na seção de testes gradativamente, esperando-se a estabilização das grandezas medidas.

Esta operação permite uma estimativa do tempo de resposta dos sensores de temperatura e uma observação qualitativa do bom funcionamento dos termopares de parede. Durante os testes em que o escoamento consiste somente de líquido, não se observa flutuações nos indicadores de vazão ou pressão.

Estes testes, além de mostrar o correto funcionamento dos sistemas de medição de temperatura, determinam a necessidade da limitação da faixa de variação dos diversos parâmetros de modo a se operar o circuito em condições de máximo aproveitamento.

3.4 - PROCESSO OPERATÓRIO

A partir do fluxograma da FIGURA III - 9 são descritos, detalhadamente, os processos utilizados para colocação do dispositivo experimental em funcionamento, estabelecimento das condições de operação, registro das grandezas envolvidas e o posterior desligamento. Para maior clareza dos processos, toma-se por referência a FIGURA III - 2 que mostra o esquema simplificado da parte hidráulica do circuito.

3.4.1 - Colocação do Circuito em Funcionamento

Para esta operação são requeridas as seguintes eta-

pas:

- 1 - Ligar a alimentação da água, atuando-se na válvula V_2 de maneira a abri-la completamente.
- 2 - Ligar a JUNTA FRIA eletrônica, através da chave liga-desliga, situada em sua própria carcaça.
- 3 - Ligar registradores de carta e voltímetros a.c. e d.c., todos através de seus interruptores.
- 4- Purgar o ar contido no circuito através da válvula V_3
- 5 - Ligar o retificador de alimentação da Seção de testes.

3.4.2 - Estabelecimento das Condições de Teste

Para o estabelecimento das condições de teste necessárias, têm-se as seguintes etapas:

- 1 - Ajusta-se a vazão de entrada no valor desejado, através da válvula do rotâmetro que vai ser usado.
- 2 - Abre-se a válvula V_1 para o dreno, de modo a esgotar a seção de testes.

3 - Opera-se o potenciômetro do retificador que fornece potência à seção de testes até obter-se a tensão de interesse. Cada valor de tensão corresponde a um valor de temperatura de parede que a seção de testes vai atingir.

4 - Fecha-se completamente V_1 deixando-a para abrir, a um sinal elétrico, no sentido do refrigerante escoar para a seção de teste.

3.4.3 - Procedimento Durante um Teste

1 - Quando o circuito se estabiliza nas condições para o início de um teste, são coletados os valores dos seguintes parâmetros:

1.1 - Vazão, pela leitura direta do rotâmetro

1.2 - Temperatura de entrada d'água na seção de testes, através dos registradores de carta.

1.3 - Tensão aplicada a seção de testes, pela leitura direta no voltímetro

1.4 - Temperatura ambiente, por leitura de um termômetro de bulbo.

1.5 - Temperatura de parede da seção de teste, através dos registradores de carta.

2 - Paraliza-se o deslocamento do papel dos registradores dos termopares de parede. A seguir, atua-se no mecanismo de controle da velocidade do deslocamento do papel, aumentando-a. Isto ainda com o papel parado.

3 - Simultaneamente abre-se a válvula automática de admissão de água na seção de testes e destrava-se o mecanismo de deslocamento do papel do registrador a fim de permitir seu movimento. Isto é feito através das chaves que cada um possui.

4 - Aguarda-se a queda do último termopar de parede e sua posterior estabilização.

3.4.4 - Desligamento do Circuito

Completado o teste, desliga-se o circuito, seguindo as etapas:

- 1 - Desligar o retificador
- 2 - Desligar registradores de carta e voltímetros
- 3 - Fechar a válvula de admissão de água na seção de testes.
- 4 - Abrir a válvula de drenagem
- 5 - Desligar a "JUNTA FRIA" eletrônica
- 6 - Fechar a válvula de alimentação d'água do circuito

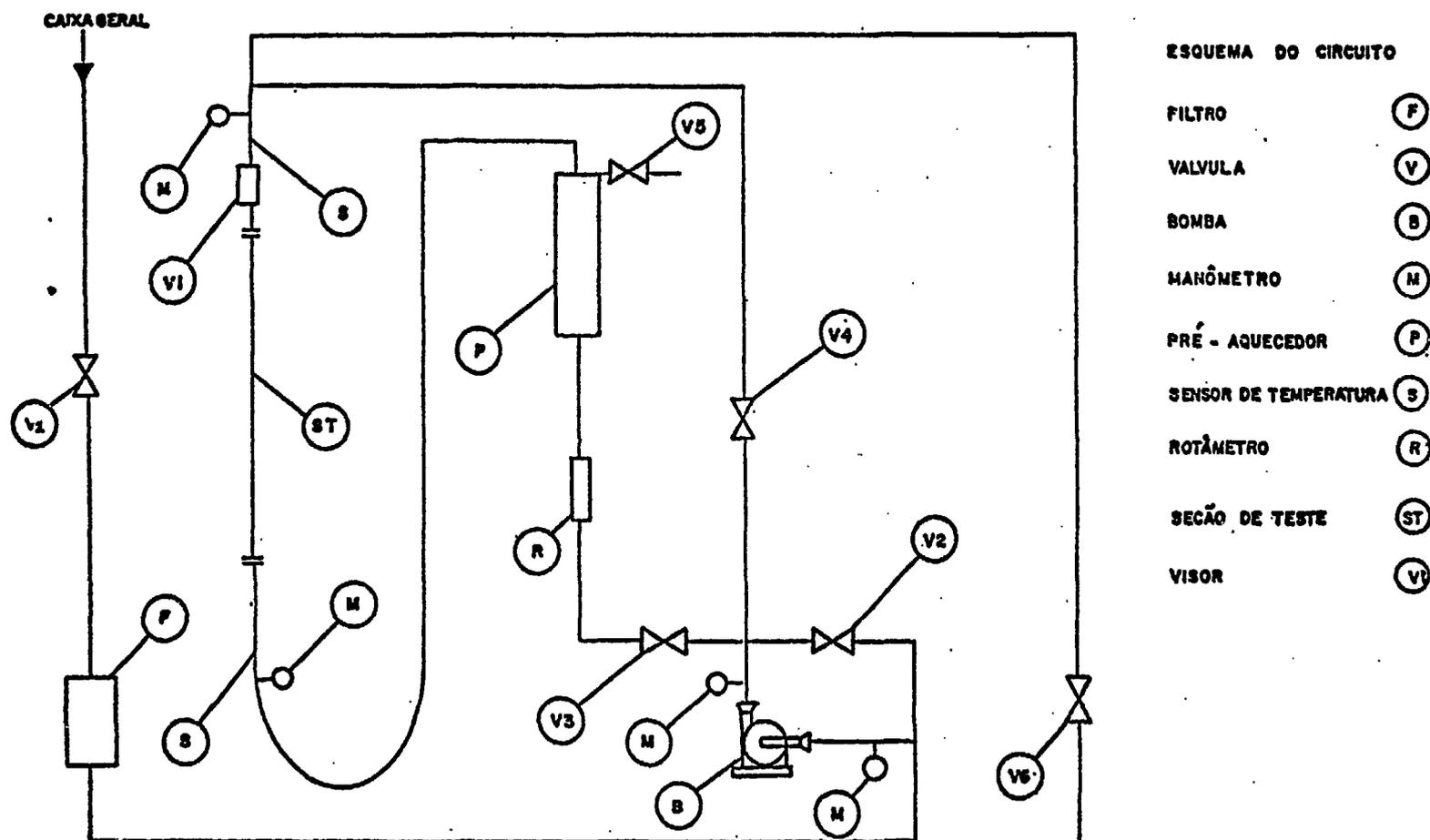


FIGURA III-1: FLUXOGRAMA DO CS - 1

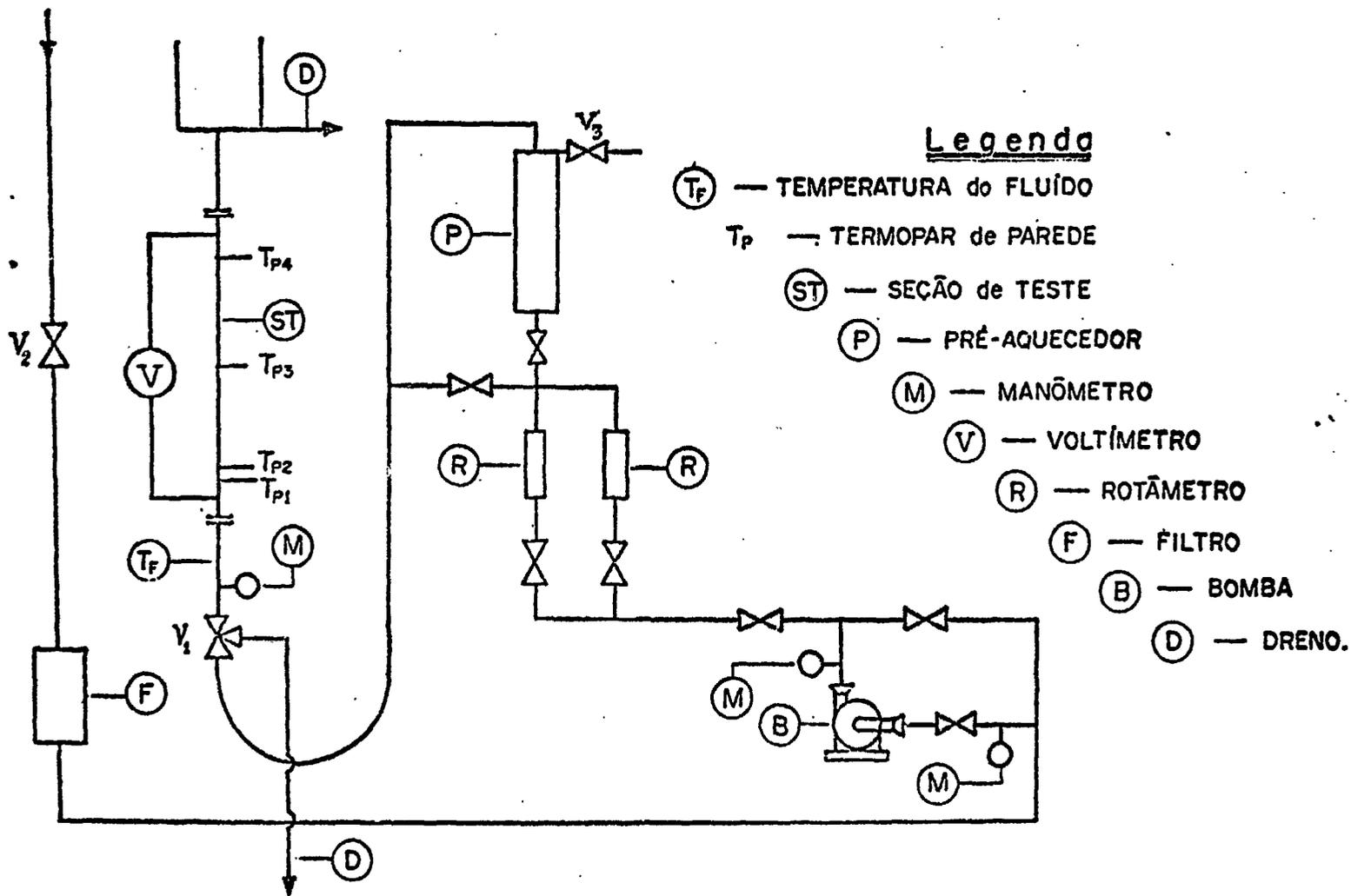


FIGURA III-2: FLUXOGRAMA DO CS - 1 MODIFICADO

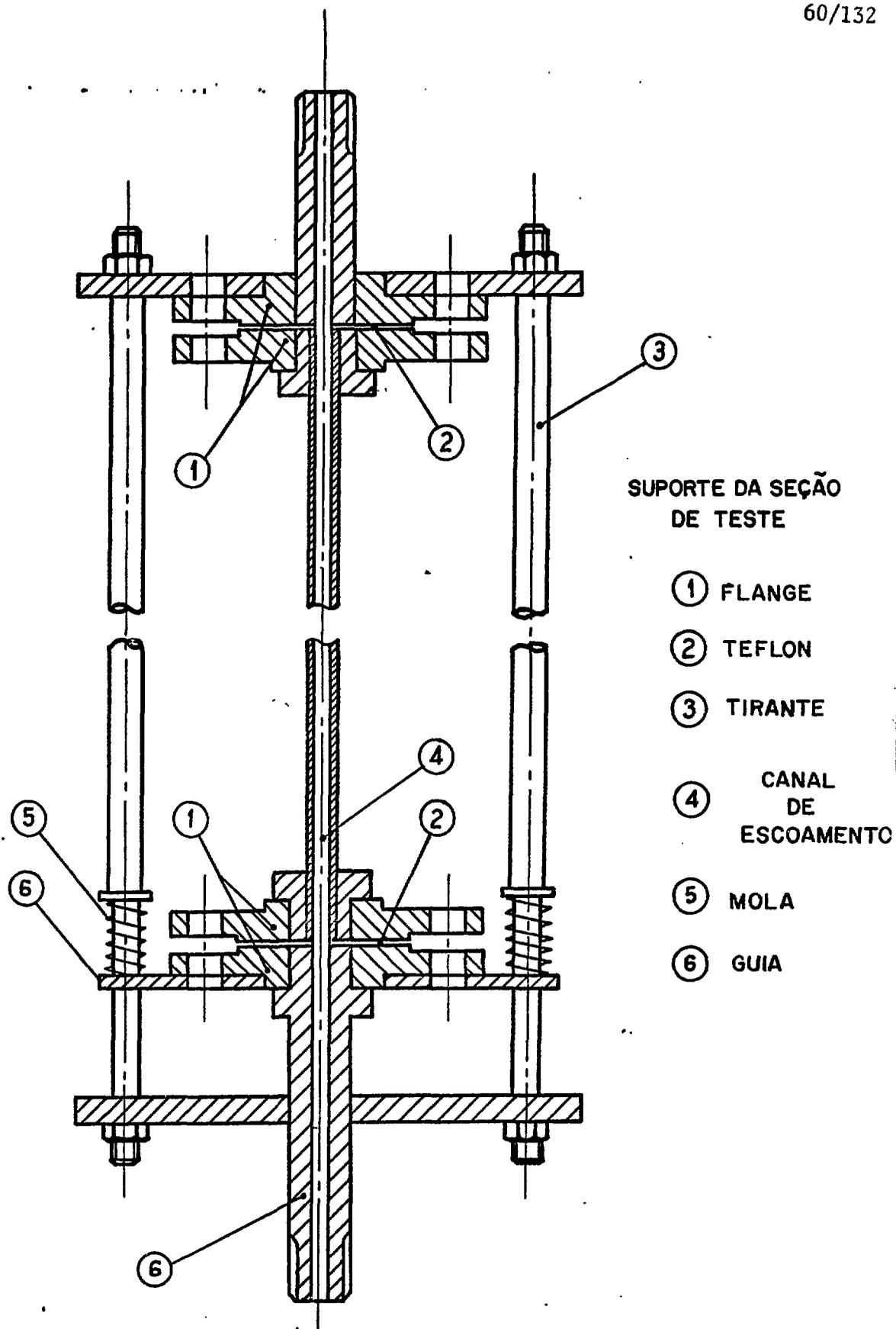
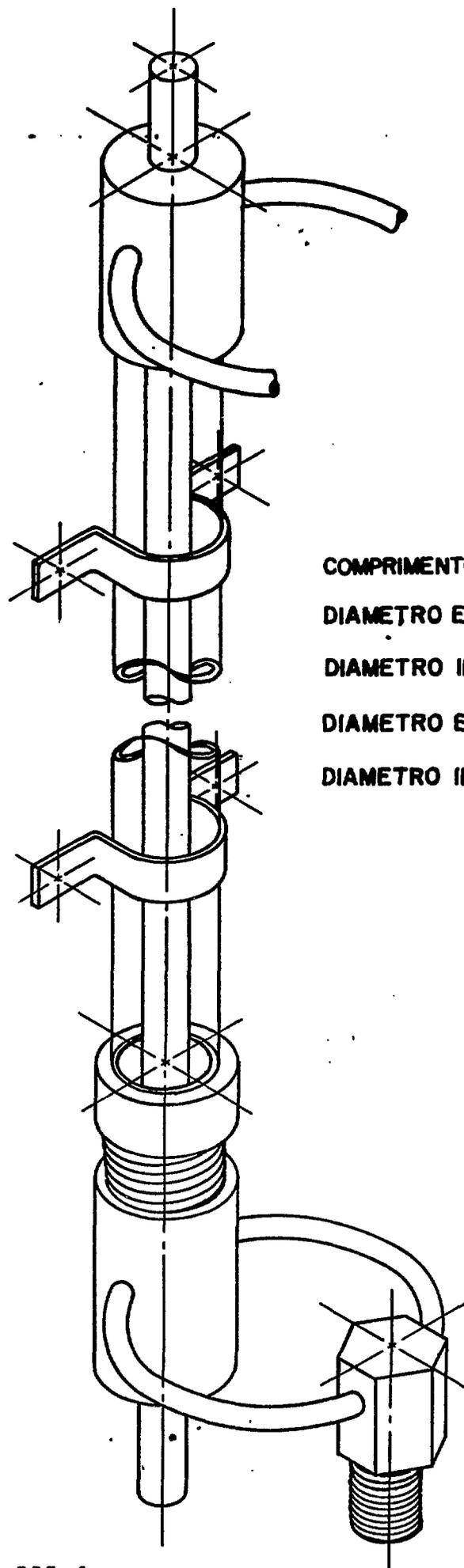


FIGURA III-3
CIRCUITO SUPORTE Nº1 - SEÇÃO DE TESTES TUBULAR



COMPRIMENTO TOTAL DO TUBO - 1.600 m.m.
DIAMETRO EXTERNO DO TUBO - 8 m.m.
DIAMETRO INTERNO DO TUBO - 6 m.m.
DIAMETRO EXTERNO DO VIDRO - 18,6 m.m.
DIAMETRO INTERNO DO VIDRO - 12,5 m.m.

FIGURA III-4

CIRCUITO SUPORTE Nº 1 - SEÇÃO DE TESTES ANULAR

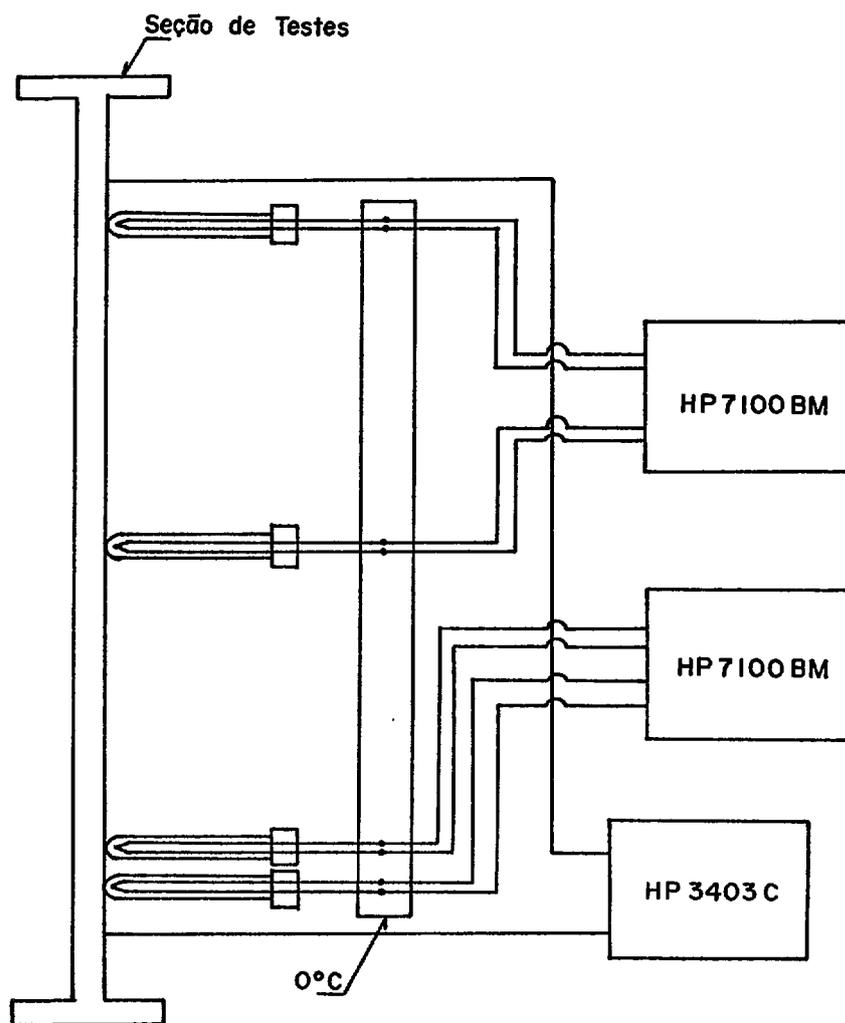


FIGURA III-5: ESQUEMA DA INSTRUMENTAÇÃO DA SEÇÃO DE TESTES

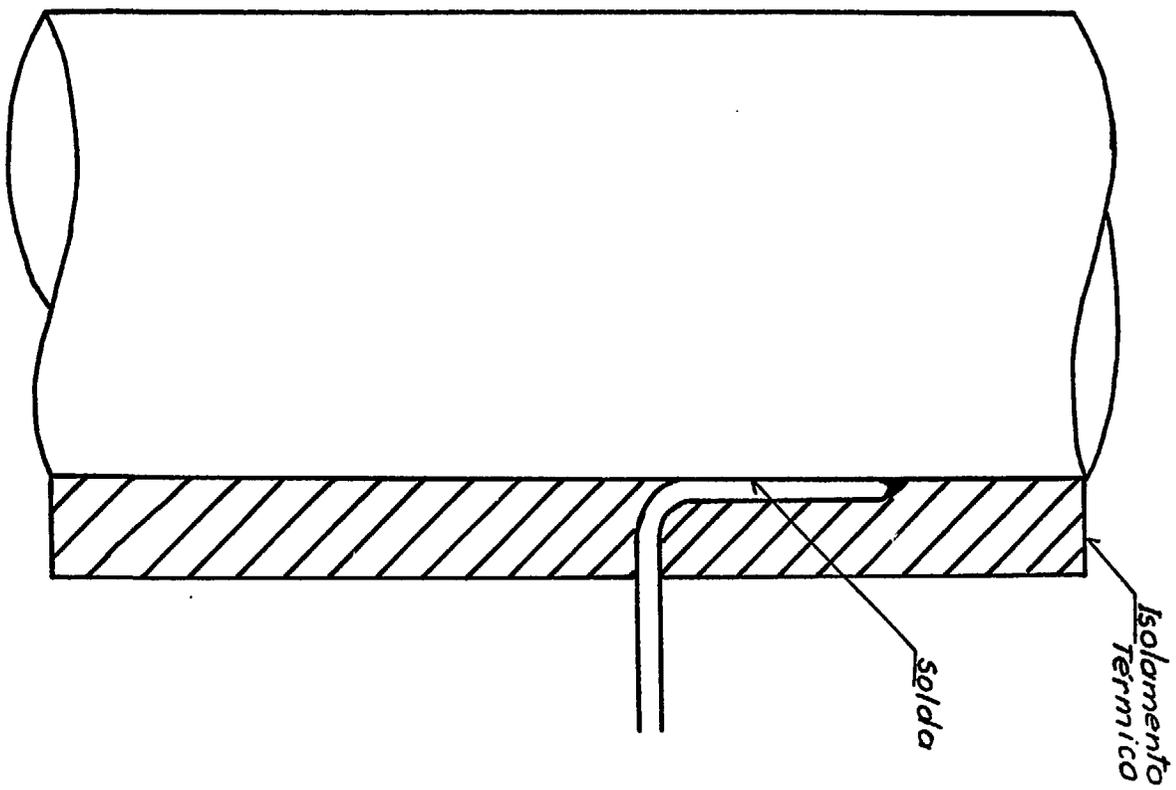


FIGURA III-6: FIXAÇÃO DOS TERMOPARES NA S.T.

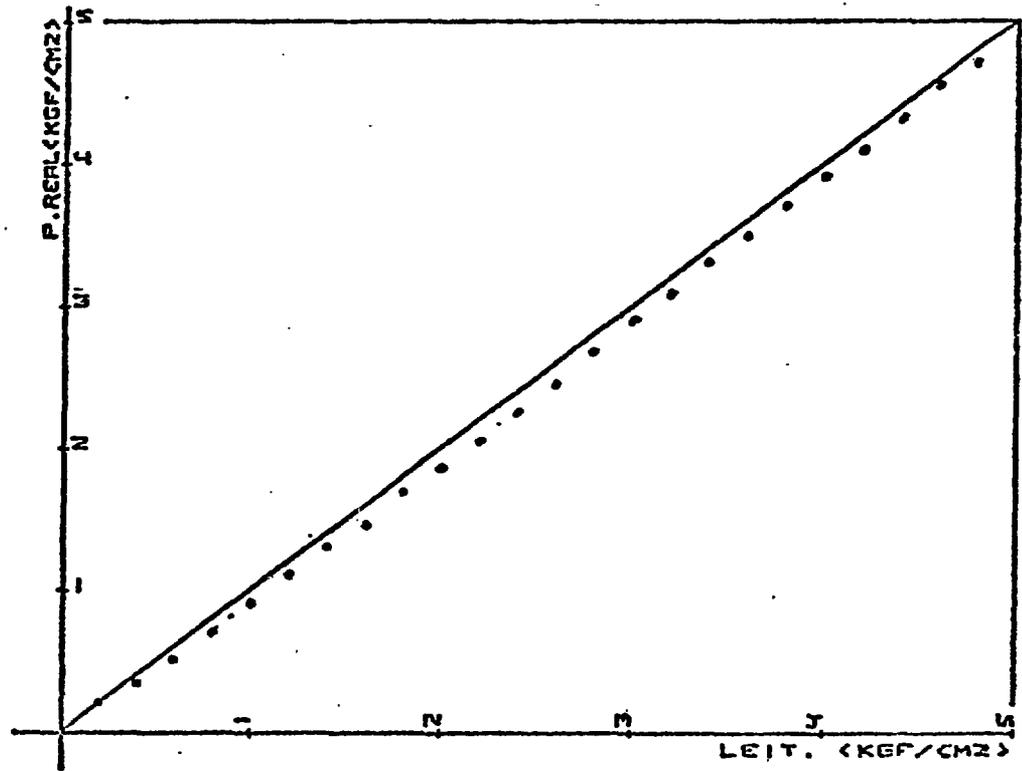


FIGURA III-7: CURVA DE CALIBRAÇÃO DOS MANÔMETROS DE ENTRADA E SAÍDA DA SEÇÃO DE TESTES

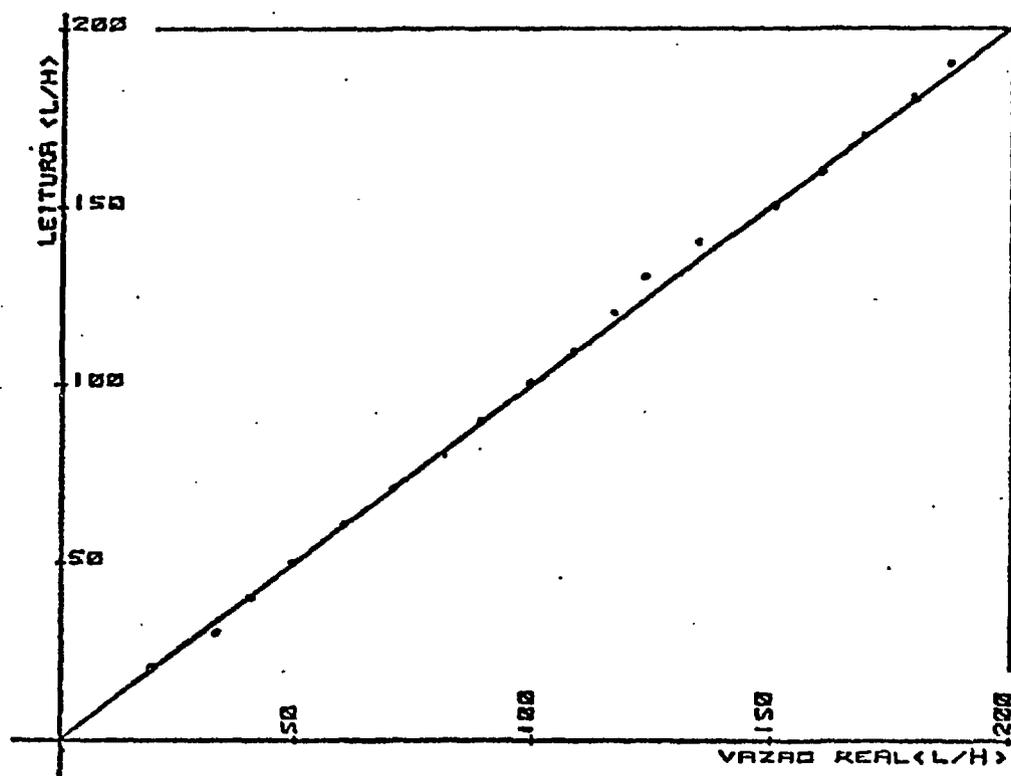


FIGURA III-8: CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ROTÂMETRO DO CIRCUITO

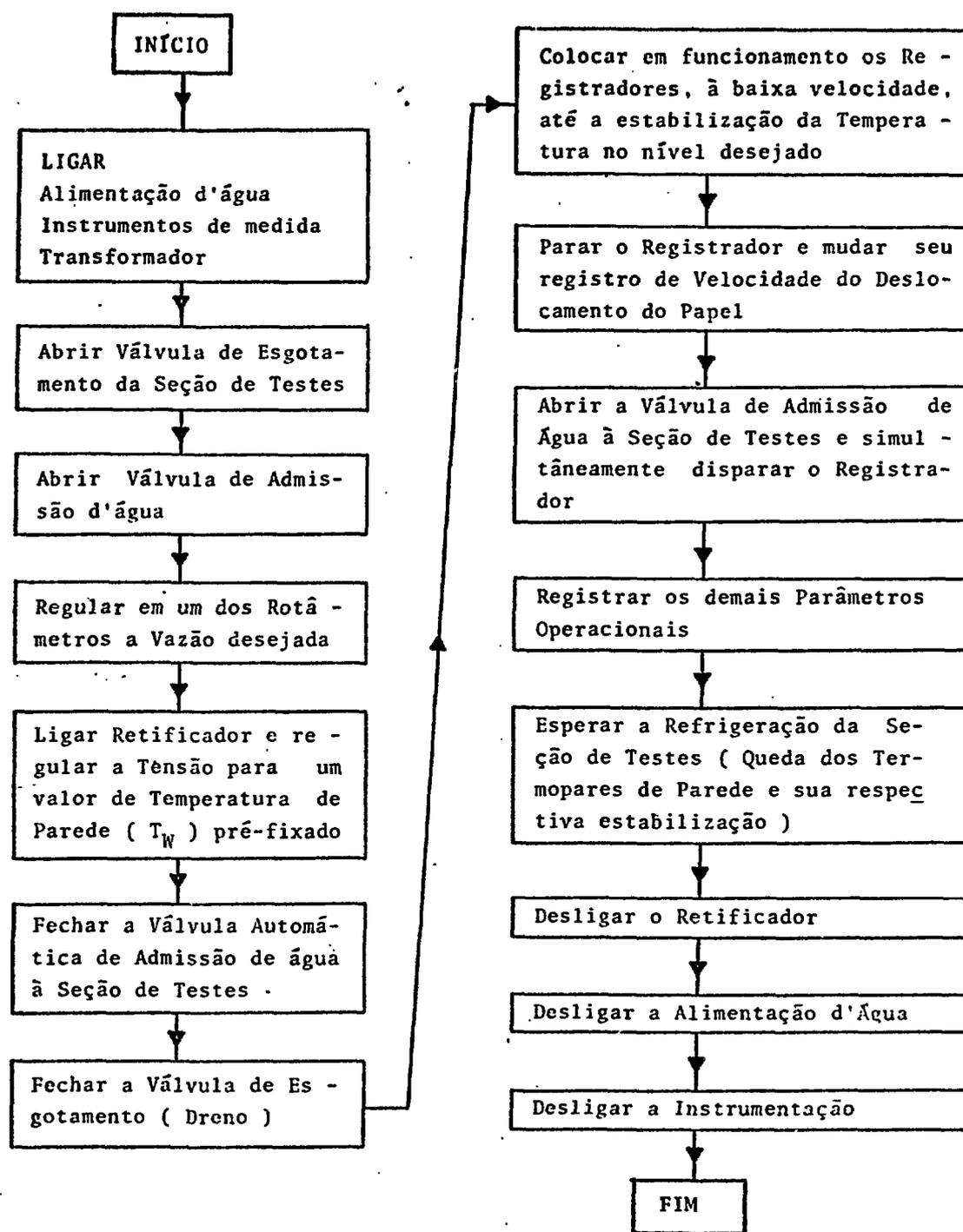


FIGURA III-9: FLUXOGRAMA DO PROCESSO OPERATÓRIO DO
CIRCUITO DE TESTES

CAPÍTULO IV

AS CAMPANHAS DE TESTES

4.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo objetiva-se a fornecer o método adotado para que fossem delimitadas as faixas de variação dos parâmetros envolvidos nos testes, bem como para que a campanha de testes fosse definida.

Nele também é feita a apresentação dos resultados obtidos nessa campanha de testes e que são significativos para a análise descrita no capítulo 5.

4.2 - DELIMITAÇÃO DAS FAIXAS DE VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS

Pretendia-se, originalmente, cobrir a faixa de variação dos parâmetros mais ampla possível entre as apresentadas na tabela II.1, para as geometrias tubular e anular. Contudo restrições operacionais intrínsecas ao circuito levam a delimitação das taxas de variação dos parâmetros de controle (vazão - velocidade de injeção, pressão, temperatura de parede, temperatura de entrada de refrigerante, fluxo imposto) a basear-se, essencialmente, na capacidade existente, em termos da disponibilidade de equipamento para monitoração, simulação e acompanhamento do fenômeno do remolhamento.

4.2.1 - Vazão - Velocidade de Injeção de Refrigerante

Os rotômetros instalados no circuito tem escalas de 2 a 20 ℓ/h e de 20 a 200 ℓ/h o que corresponde, na geometria de teste idealizada para as experiências, à faixa de velocidade de injeção de 2 a 200 cm/s e 0,76 a 76 cm/s para as geometrias tubular e anular, respectivamente.

Consequentemente o limite inferior da vazão foi 2 ℓ/h e o das velocidades de injeção 2 cm/s e 0,76 cm/s para as geometrias tubular e anular, respectivamente.

O superior foi limitado pelo tempo mínimo de duração de um teste que a instrumentação disponível fosse capaz de acompanhar, e.g., para vazões superiores a 80 ℓ/h o tempo de queda da temperatura de parede era muito superior ao tempo de respostas dos detetores gráficos de modo que a queda de temperatura era, praticamente, instatânea e nada se podia detetar. Baseado nisso o limite superior da vazão foi 80 ℓ/h e o das velocidades de injeção 80 cm/s e 30,40 cm/s para as geometrias tubular e anular, respectivamente.

4.2.2 - Temperatura de Parede

A temperatura mínima de parede foi escolhida como sendo 300°C porque a temperatura de operação normal de um reator PWR é dessa ordem (340°C para PWR - 280°C para BWR).

A temperatura máxima deveria ser da ordem de 800°C uma vez que essa é a temperatura média do núcleo do reator no início do remolhamento (1). No entanto como os termopares fo-

ram instalados nas seções de testes por meio de solda prata, esse limite não pode ser obtido, sendo estabelecido posteriormente em 600°C.

4.2.3 - Pressão

Considerou-se somente a pressão atmosférica porque este era o primeiro estudo experimental que o laboratório realizava nesta área e o concenso geral era que a variação desse parâmetro caberia num programa experimental posterior. Além disso, o circuito não tinha flexibilidade para tal.

4.2.4 - Temperatura de Entrada do Refrigerante

A temperatura da água à entrada da seção de testes poderia variar desde a ambiente (-20°C) até um máximo, correspondente à vazão mínima e máxima dissipação de potência no pré-aquecedor.

Contudo, durante a realização dos testes preliminares de ajuste da instrumentação, verificou-se que a utilização do circuito com a circulação de líquido através do pré-aquecedor, levava sistematicamente a erros na determinação da velocidade da frente de molhamento, devido à presença de um volume de ar neste componente, que retardava a injeção de água, após a abertura da válvula de admissão. Como não se conseguiu eliminar este inconveniente, introduziu-se um desvio no pré-aquecedor e os demais testes foram realizados com água a temperatura ambiente.

4.2.5 - Potência de Aquecimento da S.T. (P)

Tendo em vista as características do sistema de suprimento de potência utilizado (24V máx e 300A máx), assim como o valor da resistência elétrica da seção de testes (0,05 Ω a 600 °C), a capacidade máxima de dissipação ficou limitada a 4,5 KW, que nos leva a um valor da potência de aquecimento máx^{ima} de 72 W/cm². Este valor, entretanto, é excessivo para a obtenção do valor máximo de temperatura de parede (600 °C) coberto pelas experiências, tendo se limitado a 21 W/cm² máximo.

4.2.6 - Faixas Delimitadas Para as Grandezas

Dos ítems anteriores pode se resumir que, durante todos os testes de reinundação realizados, os parâmetros se situaram dentro das seguintes faixas:

Pressão -----	atmosférica
Temperatura de entrada -----	temperatura do refrige- rante medida no início do teste (ambi- ente).
Vazão -----	2-80 l/h

Velocidade de injeção de
refrigerante ----- 2- 80 cm/s (STT)
1- 31 cm/s (STA)

Temperatura inicial de parede --- 300 - 600 °C

Potência de Aquecimento da
S.T. ----- 1 - 21 W/cm²

4.3 - CAMPANHA DE TESTES

Antes de se iniciar efetivamente a campanha de testes foram realizados, alguns testes com finalidade de otimizar a instrumentação e dominar a sistemática de operação do circuito de simulação de remolhamento. Portanto, houve uma série de testes preliminares e a seguir é que realmente iniciou-se a campanha de testes.

A campanha de testes foi dividida em duas etapas: a realizada com a seção de testes tubular e a com a seção de testes anular.

A campanha com seção de testes tubular visa observar e medir velocidade da frente de molhamento nas diversas condições de testes. Por outro lado a campanha com seção de testes anular tem como objetivo principal acompanhar visualmente a evolução da frente de molhamento.

4.3.1 - Campanha de Testes - Seção de Testes Tubular

4.3.1.1 Testes Preliminares

Nessa primeira fase de testes foi possível se decidir entre duas alternativas de termopares que dispunhamos: termopar nu com isolamento de mica entre a seção de testes e o termopar, para evitar o inconveniente das correntes parasitas devido a seção estar submetida a uma diferença de potencial ; outra por solda de termopares com isolamento mineral à seção de testes. A segunda solução se apresentou como a melhor, apesar de se dispor da soldagem por solda-prata o que nos limitou a faixa de operação do circuito em termos da temperatura máxima de parede.

Para sistema de coleta de dados e registro dos sinais dos termopares de parede colocados em 4 cotas diferentes da seção de testes também dispunhamos de duas alternativas. A primeira, um registrador de 50 canais acoplado aos sinais amplificados dos 4 termopares e aos 5 sinais de tensão. Esse aparelho multicanal tem uma velocidade de operação em torno de 700 leituras por minuto o que implica em praticamente uma leitura de cada termopar por segundo e que não é suficiente para acompanhar a variação da temperatura de parede em cada cota no instante do remolhamento. Além disso devido à lentidão deste sistema fica excluída a possibilidade de acompanhamento qualitativo da experiência durante seu desenrolar.

A segunda alternativa, pela qual optou-se, foi a do sistema de coletas de dados ser constituído por uma série de registradores de carta, único sistema alternativo disponível.

Tal sistema, longe de ser o ideal, apesar de mais vantajoso sob o aspecto do acompanhamento da experiência, apresenta grande inconveniente no que se refere ao tratamento quantitativo dos resultados. Na FIGURA IV-1 pode ser visto um registro típico de termopares de parede, acoplados ao sistema, durante um teste.

Esses testes levaram à eliminação do pré-aquecedor e permitiram otimizar o sistema de drenagem da seção de testes, não só em sua entrada mas também em sua saída, além de demonstrar que o tipo de válvula de isolamento da seção de testes, da qual dispunha-se, tinha o inconveniente de parar de funcionar devido a qualquer sujeira da tubulação que a pudessem atingir, fato que exigiu sua desmontagem e conseqüente paralisação do circuito para sua limpeza, ao longo de toda a campanha de testes, apesar da existência do filtro F (FIGURA III-2).

A sistemática de secagem da seção de testes foi aperfeiçoada com a colocação do recipiente de coleta d'água em sua saída, que passou a impedir o acúmulo de refrigerante, evitando que o último termopar (T_4), localizado quase à saída da seção de testes, deixasse de atingir o nível dos demais na fase de estabilização, assim como minimizasse o efeito de resfriamento descendente durante a realização dos testes.

4.3.1.2 Testes com Isolamento Térmico

Estes testes foram realizados em presença de cama-

da de lã de vidro em torno da seção de testes.

Foi constatado que não se obtinha um perfil de temperatura homogêneo em presença do isolamento térmico, devido ao efeito de condução axial nas extremidades. Tal efeito, bem como a não disponibilidade de isolamento térmico compatível com os níveis de temperaturas atingidos, levaram a limitar a exploração deste tipo de teste pois a lã de vidro disponível se queimava facilmente. Os testes com isolamento térmico só foram realizados para o nível de temperatura mais reduzido.

Na FIGURA IV-2 é apresentado um registro típico destes testes onde pode ser visto nitidamente o efeito da condução axial nos termopares das extremidades.

4.3.1.3 Testes sem Isolamento Térmico

A maior parte dos testes realizados se deu nestas condições, sendo que eles basicamente foram feitos à temperaturas de parede de 300, 400, 500 e 600 °C e à valores de vazão de 02, 06, 10, 16, 20, 30, 40, 60, 80, l/h.

Em tais condições o tempo de estabilização da temperatura inicial de parede, para cada teste, foi sensivelmente aumentado bem como o valor da tensão necessária com relação aos testes com isolamento térmico.

As FIGURAS de IV-3 a IV-6 são os registros típicos

para as temperaturas de 300, 400, 500 e 600 °C,

4.3.1.4 Testes Complementares

No exame da literatura relativa a realização de testes de refrigeração de emergência, depara-se com figuras típicas onde o valor da temperatura de parede, no início do teste, não se acha estabilizada, crescendo continuamente até o ponto denominado de retorno onde ocorre o valor máximo da temperatura de parede. Aparentemente, a realização de tais testes se dá através de condições nas quais o fluxo de calor aplicado à seção de testes é, variável ou, no caso de ser constante, não se atingiu a estabilização da temperatura de parede. Assim sendo, procurou-se realizar testes nestas condições, procedendo-se da seguinte forma:

- Como já haviam sido calculadas as tensões necessárias para que a temperatura estabilizasse num dado valor de T_p , por exemplo em torno de 400 °C e 500 °C, estabilizou-se essa temperatura no valor inicial em torno de 400 °C.
- Isto feito, aumentou-se a tensão para o valor que estabilizasse T_p em torno de 500 °C.
- Simultaneamente ao aumento da tensão, foi aberta a válvula de admissão de água de refrigeração à seção de testes e acionou-se o sistema de coleta de dados.

A FIGURA IV-7 é o registro típico de um teste desse tipo. Essa figura além de corresponder à encontrada em certas situações apresentadas na literatura, mostra claramente o ponto de retorno nas diversas cotas. (20) (49)

4.3.2 Campanha de Testes - Seção de Testes Anular

Baseado na Campanha realizada com a seção de testes tubular, fases sem isolação e complementar, idealizou-se a que ia se realizar com a seção de testes anular.

Nestes testes fixou-se o seguinte:

- Não se esperou T_p estabilizar, mas sim atingir um valor fixado para início do teste.
- Só foram realizados testes com T_p pouco acima de 500 °C porque o choque térmico que o vidro so - fria não permitia que se atingisse um valor superior. O vidro pyrex acima dos valores de T_p apresentados neste trabalho, invariavelmente se partia.

Um registro típico desta série de teste é apresentado na FIGURA IV-8. Nela pode se observar a temperatura de retorno para as três cotas onde acompanhava-se a evolução temporal de T_p .

4.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados obtidos durante as experiências realiza -

das com as seções de testes tubular e anular são apresentados nas TABELAS IV-1 e IV-2. Elas contêm as grandezas experimentais medidas ou calculadas em cada teste escolhido, dentre os 332 realizados, para a análise posterior.

NÚMERO DO TESTE	Q (t/h)	P (W/cm ²)	v _{inj} (cm/s)	T _e (°C)	T _{amb} (°C)	T _{pi} (°C)	T _{pf} (°C)	V (V)	ΔV (V)	t ₁₄ (s)	t ₂₄ (s)	t ₃₄ (s)	t ₁₂ (s)	t ₂₃ (s)	v ₁₄ (cm/s)	v ₂₄ (cm/s)	v ₃₄ (cm/s)	v ₁₂ (cm/s)	v ₂₃ (cm/s)
46 [⊙]	80	1,29	80	20,0	24,0	300	36	1,8	0,2	4,02	3,64	2,74	0,38	0,90	21,89	22,80	15,69	13,16	44,44
52 [⊙]	60	1,15	60	20,0	24,0	300	38	1,7	0,1	7,32	6,98	5,88	0,34	1,10	12,02	11,89	7,31	14,71	36,36
53 [⊙]	40	1,59	40	20,0	24,0	300	42	2,0	0,1	12,90	12,39	9,20	0,51	3,19	6,82	6,70	4,67	9,80	12,54
45 [⊙]	30	1,15	30	20,0	24,0	300	38	1,7	0,1	17,43	16,66	14,17	0,77	2,49	5,05	4,98	3,03	6,49	16,06
51 [⊙]	20	1,29	20	20,0	24,0	300	40	1,8	0,2	21,92	21,28	17,45	0,64	3,83	4,01	3,90	2,46	7,81	10,44
48 [⊙]	16	1,29	16	20,0	24,0	300	41	1,8	0,2	16,17	15,10	12,97	1,07	2,13	5,44	5,50	3,32	4,67	18,78
43 [⊙]	10	1,15	10	20,0	24,0	300	45	1,7	0,2	28,30	27,28	21,66	1,02	5,62	3,11	3,04	1,99	4,90	7,12
36 [⊙]	06	1,02	06	20,0	24,0	300	94	1,6	0,1	43,55	40,87	19,43	2,68	21,44	2,02	2,03	2,21	1,87	1,87
83	80	5,16	80	22,0	26,0	300	45	3,6	0,5	4,56	4,14	3,63	0,42	0,51	19,30	20,05	11,85	11,90	78,43
82	60	5,16	60	22,0	26,0	300	50	3,6	0,5	7,57	7,15	6,30	0,42	0,85	11,62	11,61	6,83	11,90	47,06
63	50	4,88	50	18,0	24,0	300	40	3,5	0,9	3,26	2,46	2,46	0,43	0,37	26,99	33,74	17,48	11,63	108,11
66	40	4,88	40	18,0	24,0	300	30	3,5	1,0	12,90	12,39	9,20	0,51	3,19	6,82	6,70	4,67	9,80	12,54
85	30	4,34	30	21,0	24,0	300	30	3,3	0,2	20,59	20,09	14,90	0,50	5,19	4,27	4,13	2,89	10,00	7,71

TABELA IV - 1 : APRESENTAÇÃO E RESULTADOS DOS TESTES DE REFRIGERAÇÃO DE EMERGÊNCIA REALIZADOS COM A SEÇÃO DE TESTES TUBULAR

NÚMERO DO TESTE	Q (l/h)	P (W/cm ²)	v _{inj} (cm/s)	T _e (°C)	T _{amb} (°C)	T _{pl} (°C)	T _{pf} (°C)	v (V)	Δv (V)	t ₁₄ (s)	t ₂₄ (s)	t ₃₄ (s)	t ₁₂ (s)	t ₂₃ (s)	v ₁₄ (cm/s)	v ₂₄ (cm/s)	v ₃₄ (cm/s)	v ₁₂ (cm/s)	v ₂₃ (cm/s)
86	20	4,61	20	21,0	24,0	300	35	3,4	0,5	16,73	15,45	11,88	1,28	3,57	5,26	5,37	3,62	3,91	11,20
84	16	6,06	16	22,0	26,0	300	40	3,9	0,5	20,40	18,91	13,70	1,49	5,21	4,31	4,39	3,14	3,36	7,68
205	10	4,34	10	22,0	26,0	300	45	3,3	0,4	72,21	71,44	37,74	0,77	33,70	1,22	1,16	1,06	6,49	1,19
201	06	4,08	06	22,0	26,0	300	27	3,2	0,1	97,10	91,02	43,56	6,08	47,46	0,91	0,91	0,99	0,82	0,84
123	80	7,37	80	20,0	23,0	400	45	4,3	0,5	7,74	7,15	4,08	0,59	3,07	11,37	11,61	10,54	8,47	13,03
109	60	7,37	60	20,0	23,0	400	45	4,3	0,7	10,11	9,68	5,32	0,44	4,36	8,70	8,57	8,08	11,36	9,17
212	50	7,71	50	22,0	26,0	400	32	4,4	1,5	9,31	9,04	8,17	0,27	0,87	9,45	9,18	5,26	18,52	45,98
214	40	8,07	40	22,0	26,0	400	45	4,5	1,7	9,57	9,30	7,88	0,27	4,75	9,20	8,92	5,46	18,52	8,42
98	30	3,83	30	22,0	25,0	400	34	3,1	1,2	14,57	14,15	12,14	0,42	2,01	6,04	5,87	3,54	11,90	19,90
99	20	7,03	20	22,0	25,0	400	32	4,2	0,8	15,65	15,23	10,65	0,42	4,58	5,62	5,45	4,04	11,90	8,73
101	16	7,03	16	22,0	25,0	400	28	4,2	0,7	20,08	19,66	17,99	0,42	1,67	4,38	4,22	2,39	11,90	23,95
105	10	6,70	10	20,0	23,0	400	30	4,1	0,5	35,31	32,88	28,39	2,43	4,49	2,49	2,52	1,51	2,06	8,91
107	06	5,45	06	20,0	23,0	400	35	3,7	0,6	99,30	93,70	49,07	5,60	44,63	0,89	0,89	0,88	0,89	0,90

TABELA IV - 1 :

(CONTINUAÇÃO)

NÚMERO DO TESTE	Q (l/h)	P (W/cm ²)	v _{inj} (cm/s)	T _e (°C)	T _{amb} (°C)	T _{pl} (°C)	T _{pf} (°C)	v (V)	ΔV (V)	t ₁₄ (s)	t ₂₄ (s)	t ₃₄ (s)	t ₁₂ (s)	t ₂₃ (s)	v ₁₄ (cm/s)	v ₂₄ (cm/s)	v ₃₄ (cm/s)	v ₁₂ (cm/s)	v ₂₃ (cm/s)
121	02	5,45	02	20,0	23,0	400	28	3,7	0,8	66,17	65,79	63,18	0,38	2,61	1,33	1,26	0,68	13,16	15,33
228	80	6,17	80	22,0	27,0	500	96	4,4	0,8	9,62	8,87	4,18	0,75	4,69	9,15	9,36	10,29	6,67	8,53
149	60	7,96	60	22,0	27,0	500	50	5,0	1,1	15,19	14,03	6,65	1,16	7,38	5,79	5,92	6,47	4,31	5,42
155	50	11,85	50	22,0	27,0	500	49	6,1	1,5	19,37	17,85	9,50	1,52	8,35	4,54	4,65	4,53	3,29	4,79
147	40	11,85	40	22,0	27,0	500	39	6,1	1,1	24,37	22,53	11,10	1,84	11,43	3,61	3,68	3,87	2,72	3,50
219	30	11,85	30	22,0	27,0	500	45	6,1	1,0	32,06	28,74	15,69	3,32	13,05	2,74	2,89	2,74	1,51	3,07
141	20	7,96	20	22,0	27,0	500	57	5,0	1,3	49,16	44,79	29,77	4,37	15,02	1,79	1,85	1,44	1,14	2,66
135	16	8,61	16	22,0	27,0	500	34	5,2	1,0	51,45	45,69	26,79	5,76	18,90	1,71	1,82	1,61	0,87	2,12
223	10	7,34	10	22,0	27,0	500	42	4,8	0,7	72,27	66,72	42,24	5,55	24,48	1,22	1,24	1,02	0,90	1,63
133	06	6,45	06	22,0	27,0	500	96	4,5	0,8	63,90	50,06	6,20	13,84	43,86	1,38	1,66	6,94	0,36	0,91
159	80	18,39	80	21,0	24,0	600	52	7,6	0,8	11,38	10,38	4,94	1,00	5,44	7,73	8,00	8,70	5,00	7,35
168	60	16,97	60	18,0	24,0	600	42	7,3	1,3	16,74	16,21	7,84	0,53	8,37	5,26	5,12	5,48	9,43	4,78
170	50	16,51	50	18,0	24,0	600	54	7,2	0,9	21,45	20,95	10,78	0,50	10,17	4,10	3,96	3,99	10,0	3,93

TABELA IV - 1 :

(CONTINUAÇÃO)

NÚMERO DO TESTE	Q (L/h)	P (W/cm ²)	v _{inj} (cm/s)	T _e (°C)	T _{amb} (°C)	T _{pi} (°C)	T _{pf} (°C)	V (V)	ΔV (V)	t ₁₄ (s)	t ₂₄ (s)	t ₃₄ (s)	t ₁₂ (s)	t ₂₃ (s)	v ₁₄ (cm/s)	v ₂₄ (cm/s)	v ₃₄ (cm/s)	v ₁₂ (cm/s)	v ₂₃ (cm/s)
169	40	16,05	40	18,0	24,0	600	51	7,1	1,6	26,22	25,63	13,77	0,59	11,86	3,36	3,24	9,12	8,47	3,37
167	30	15,61	30	18,0	24,0	600	84	7,0	1,6	38,98	38,41	20,52	0,57	17,89	2,26	2,16	2,10	8,77	2,24
236	20	20,38	20	21,0	24,0	600	51	6,9	0,9	50,00	45,88	25,00	4,12	20,88	1,76	1,81	1,72	1,21	1,92
241	16	18,39	16	21,0	24,0	600	78	7,6	0,7	64,94	59,92	36,82	5,02	23,10	1,36	1,39	1,17	1,00	1,73
173	10	11,46	10	24,0	28,0	600	50	6,0	0,9	166,38	160,50	126,89	5,88	33,61	0,53	0,52	0,34	0,85	1,19
171	06	10,71	06	24,0	28,0	600	79	5,8	0,8	170,42	158,32	74,62	12,10	83,70	0,52	0,52	0,58	0,41	0,48
233	20	14,73	20	21,0	24,0	600	51	6,8	1,0	48,75	43,13	24,06	5,62	19,06	1,81	1,92	1,79	0,89	2,10
208	02	4,88	02	22,0	26,0	300	50	3,5	0,3										
37	02	3,68	02	20,0	24,0	300	57	3,0	0,4										

⊗ Teste realizado em presença de isolamento térmico .

TABELA IV - 1 : (CONTINUAÇÃO)

NÚMERO DO TESTE	Q (l/h)	P (W/cm ²)	v _{inj} (cm/s)	T _e (°C)	T _{amb} (°C)	T _{pi} (°C)	T _{pf} (°C)	V (V)	ΔV (V)	t ₁₃ (s)	t ₂₃ (s)	t ₁₂ (s)	v ₁₃ (cm/s)	v ₂₃ (cm/s)	v ₁₂ (cm/s)
02	80	6,45	30,40	21,0	26,0	300	64	3,6	0,5	5,46	2,37	3,09	14,65	16,88	12,94
04	40	6,45	15,20	21,0	26,0	300	38	3,6	0,3	9,42	5,95	3,47	8,49	6,72	11,53
07	20	4,78	7,60	21,0	26,0	300	40	3,1	0,3	17,10	8,71	8,39	4,68	4,59	4,77
12	10	4,18	3,80	22,0	25,0	300	37	2,9	0,3	27,23	19,75	7,48	2,94	2,03	5,35
48	06	5,75	2,28	20,0	23,0	300	48	3,4	0,1	40,20	30,20	10,00	1,99	1,32	4,00
19	02	5,09	0,76	22,0	25,0	300	45	3,2	0,1	162,65	84,70	77,65	0,49	0,47	0,52
21	80	10,53	30,40	18,0	24,0	400	27	4,6	0,5	8,41	4,40	4,01	9,51	9,09	9,98
25	40	9,63	15,20	18,0	24,0	400	45	4,4	0,5	11,57	2,42	9,15	6,91	16,53	4,37
33	20	9,20	7,60	20,0	23,0	400	45	4,3	0,4	21,05	7,71	13,34	3,80	5,19	3,00
53	10	8,78	3,80	21,0	26,0	400	43	4,2	0,3	39,84	21,71	18,13	2,01	1,84	2,21
45	06	9,63	2,28	20,0	23,0	400	48	4,4	0,2	83,37	51,69	31,68	0,96	0,77	1,26
56	02	8,36	0,76	20,0	23,0	400	42	4,1	0,2	241,04	19,72	221,32	0,33	2,03	0,18
64	10	8,36	3,80	21,0	26,0	400	45	4,1	0,3	38,94	22,12	16,82	2,05	1,81	2,38

TABELA IV - 2 : APRESENTAÇÃO E RESULTADOS DOS TESTES DE REFRIGERAÇÃO DE EMERGÊNCIA REALIZADOS COM A SEÇÃO DE TESTES ANULAR

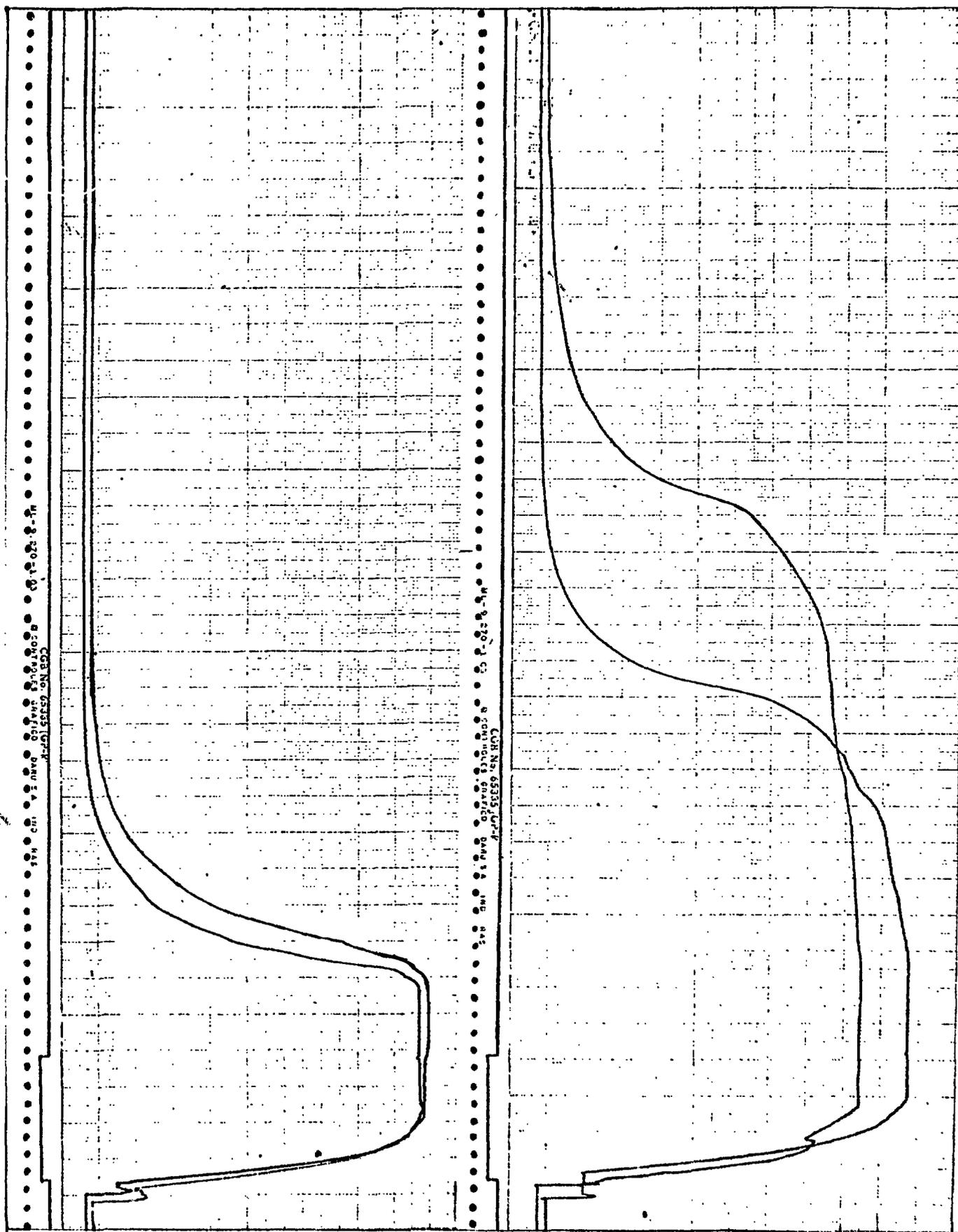


FIGURA IV-1: REGISTRO TÍPICO DOS TERMOPARES DE PAREDE

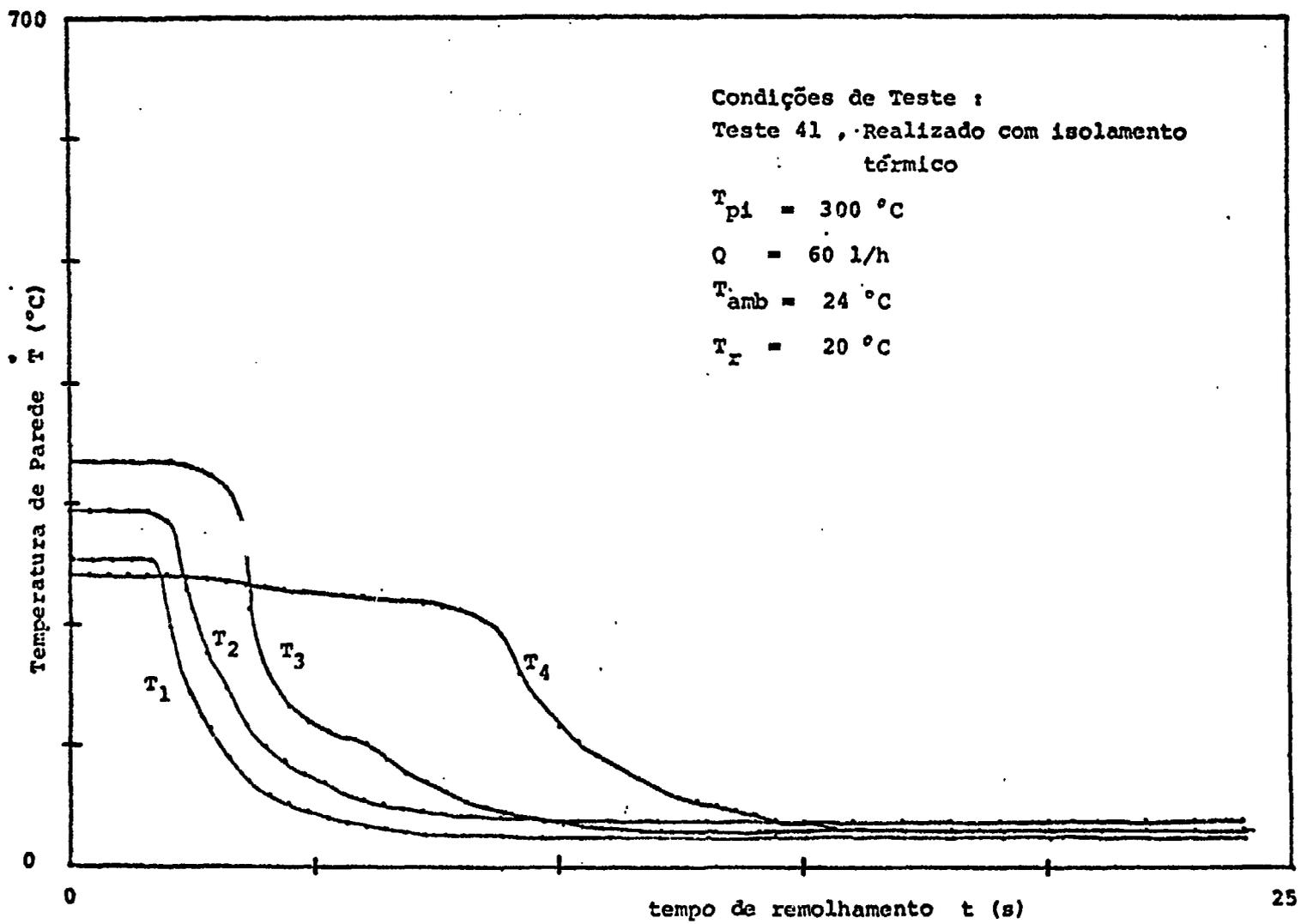


FIGURA IV-2: REGISTRO TÍPICO DOS TERMOPARES DE PAREDE

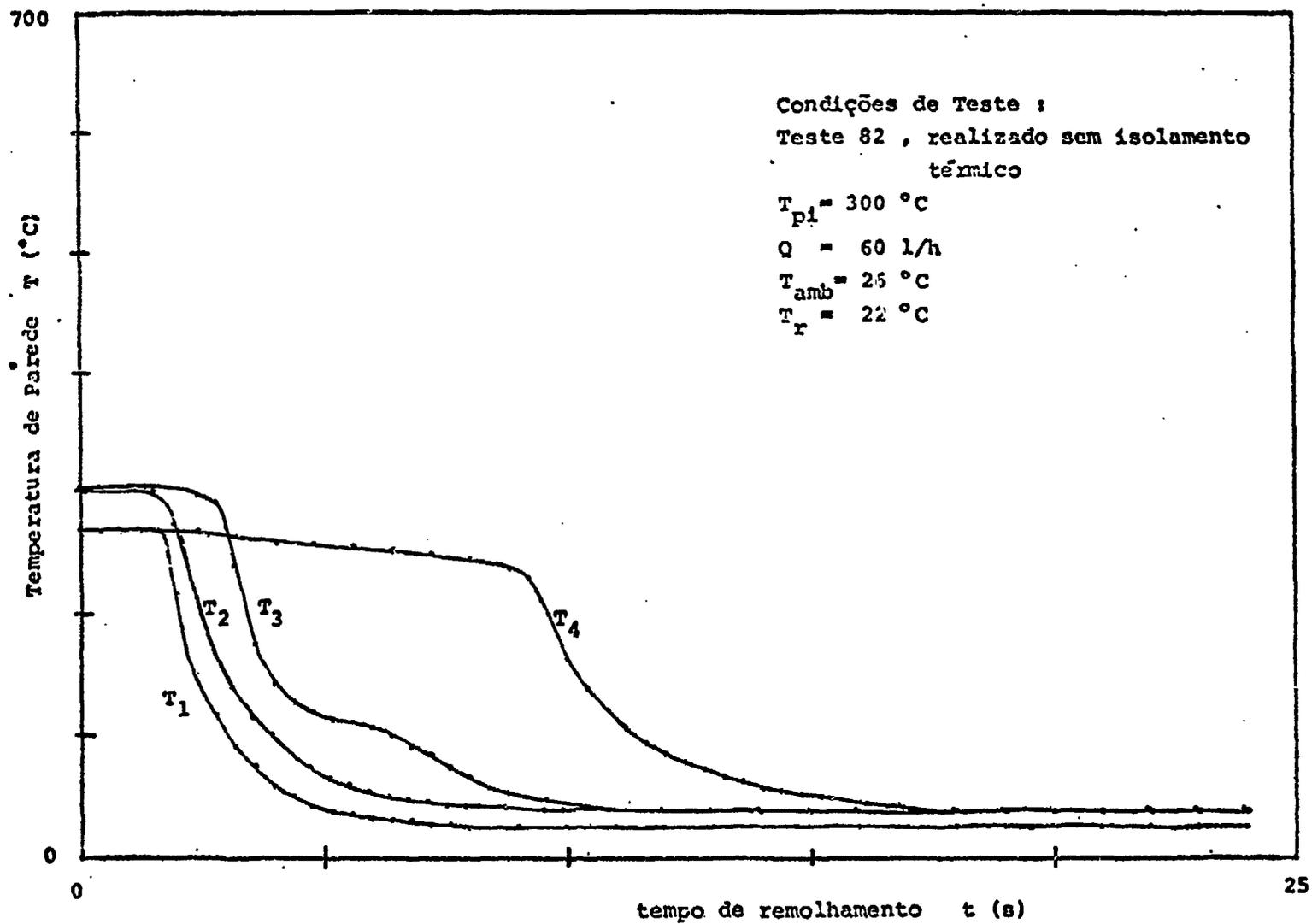


FIGURA IV-3: REGISTRO TÍPICO DOS TERMOPARES DE PAREDE

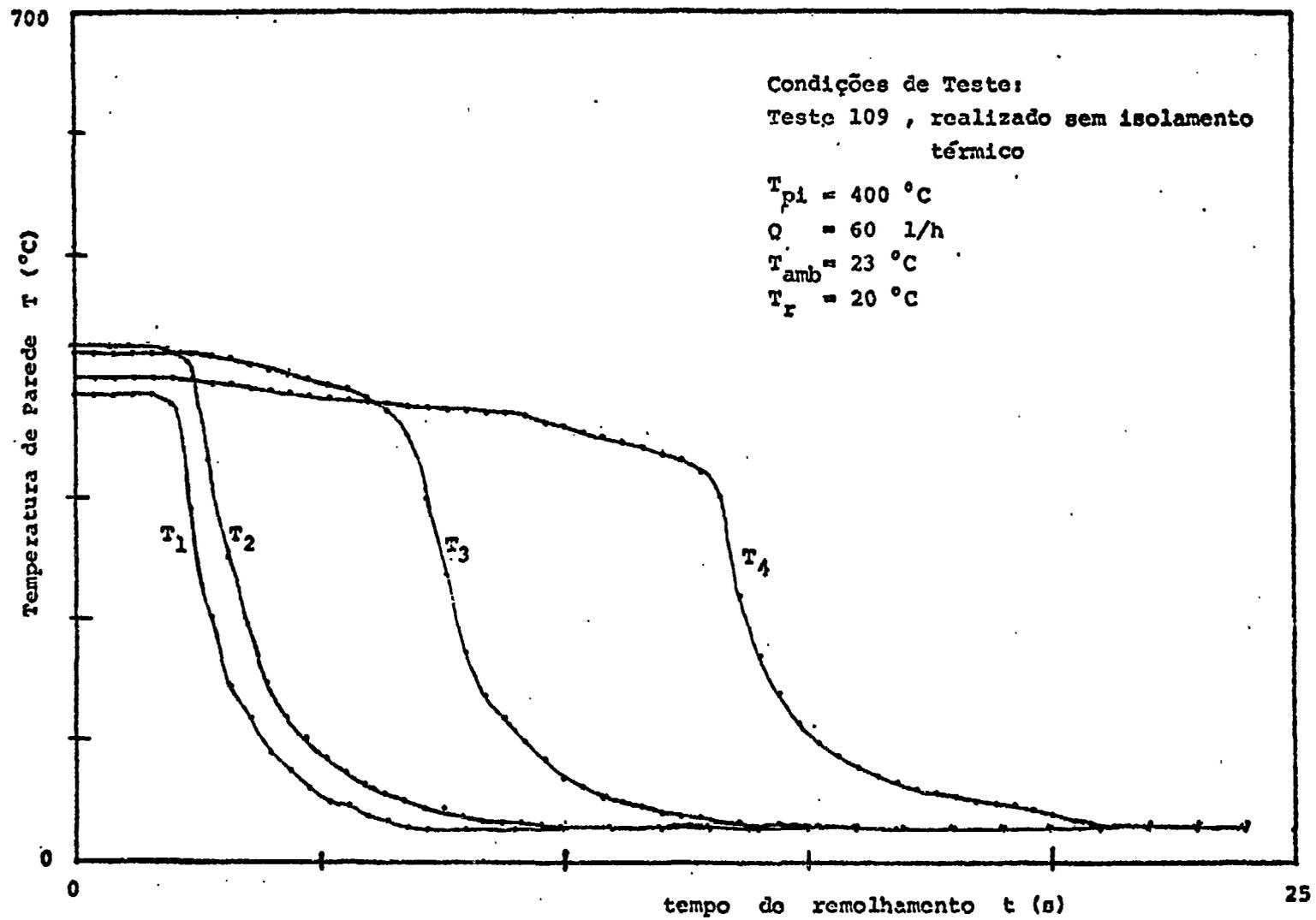


FIGURA IV-4: REGISTRO TÍPICO DOS TERMOPARES DE PAREDE

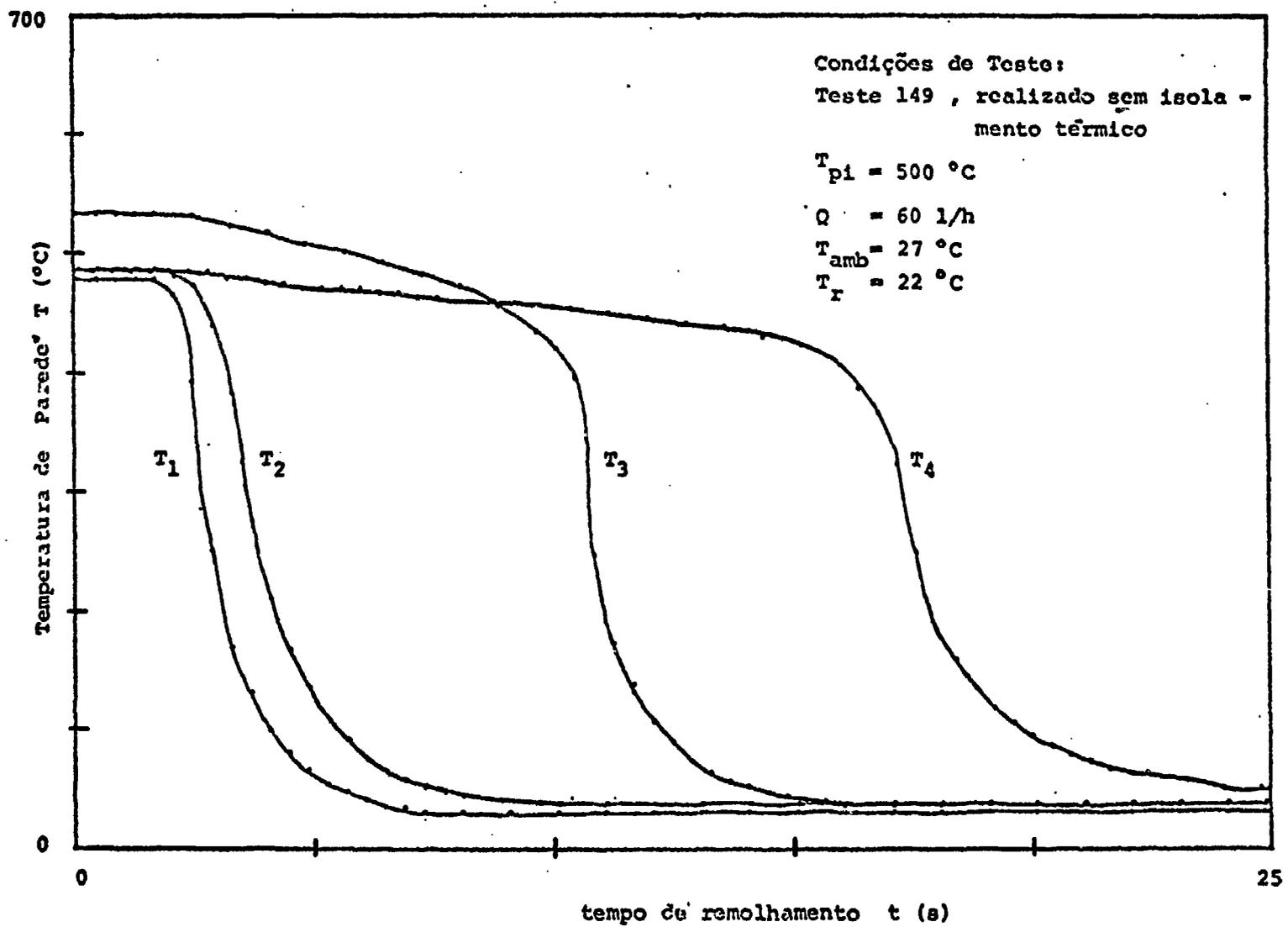


FIGURA IV-5: REGISTRO TÍPICO DOS TERMOPARES DE PAREDE

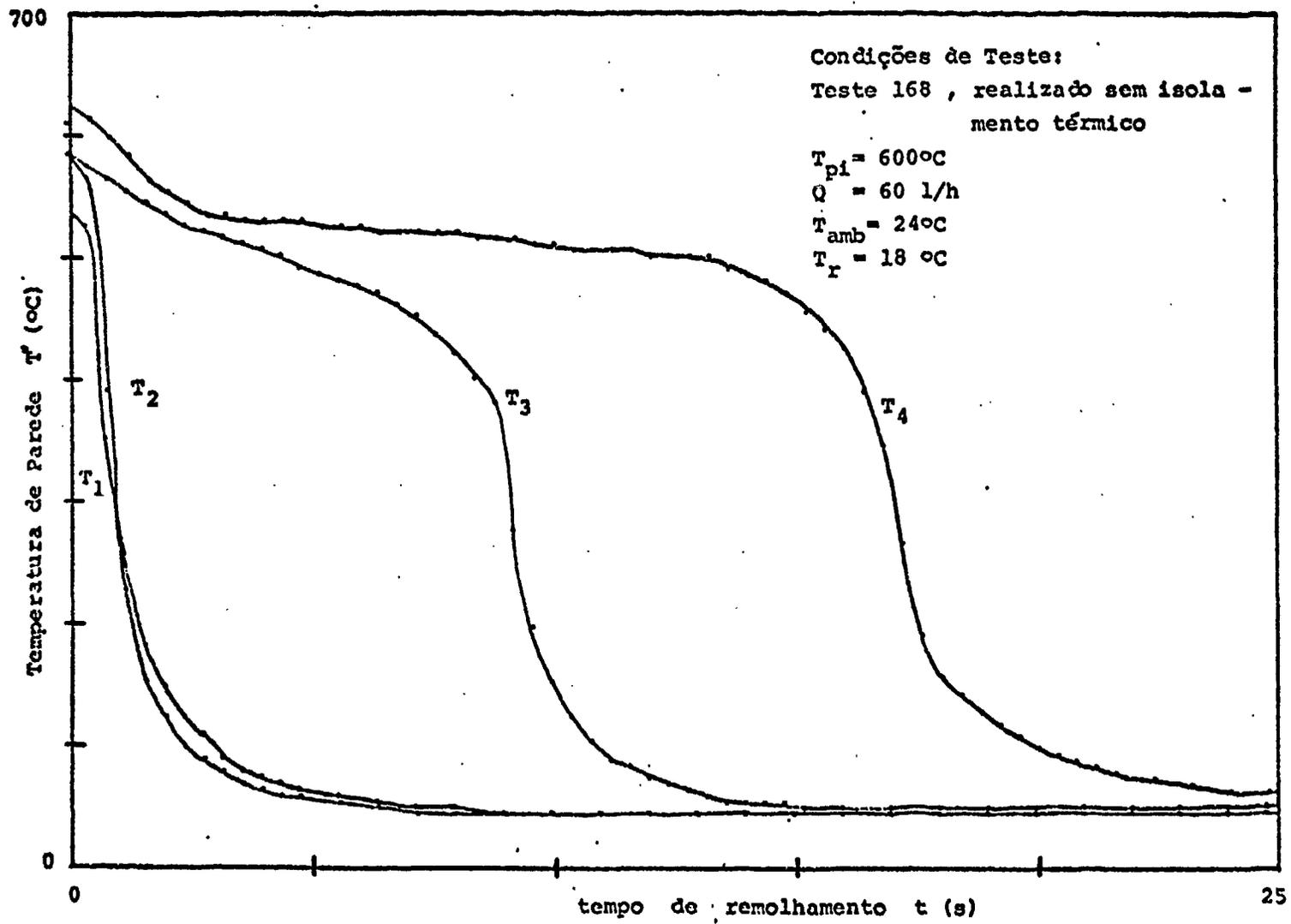


FIGURA IV-6: REGISTRO TÍPICO DOS TERMOPARES DE PAREDE

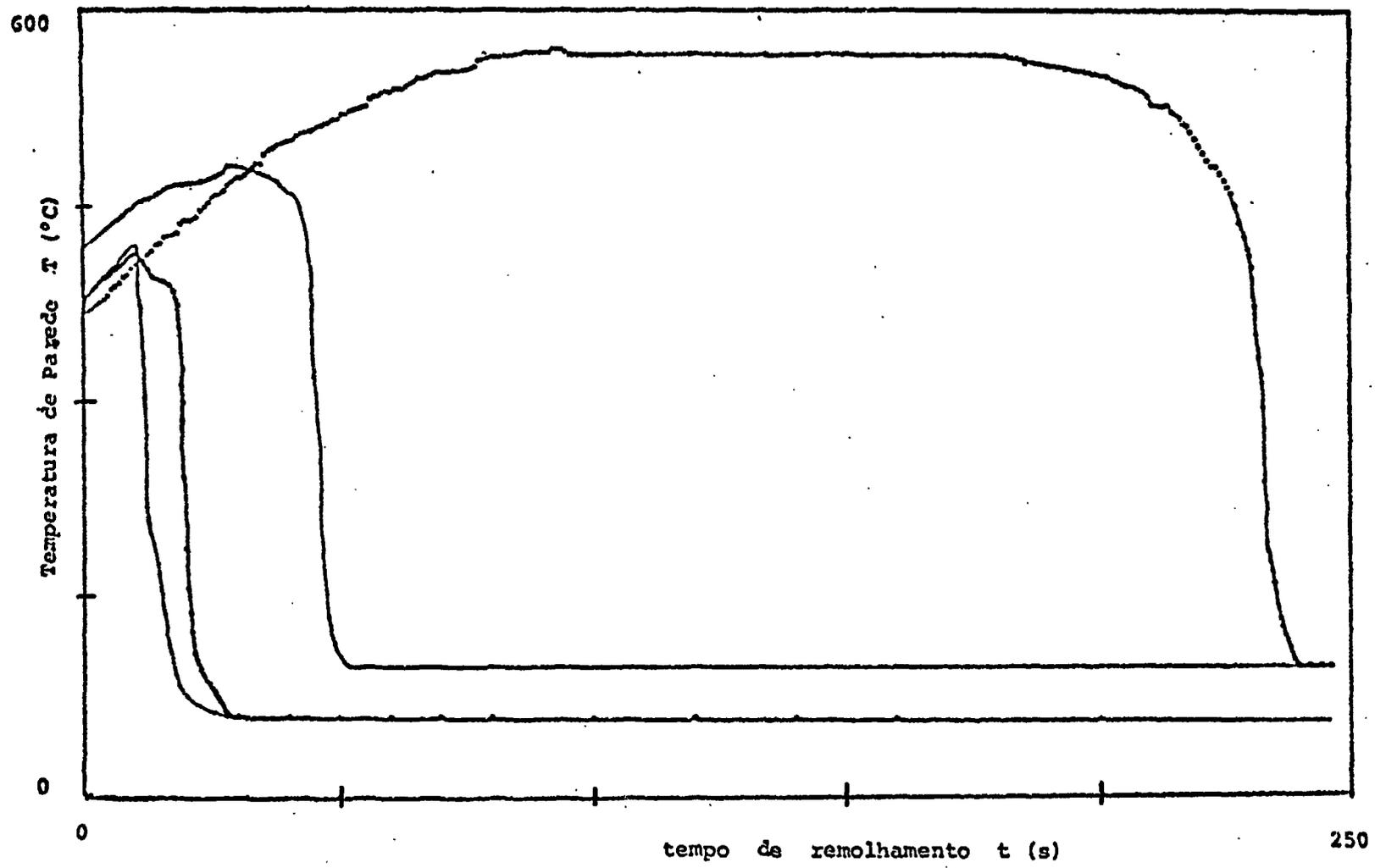


FIGURA IV-7: REGISTRO TÍPICO DOS TERMOPARES DE PAREDE

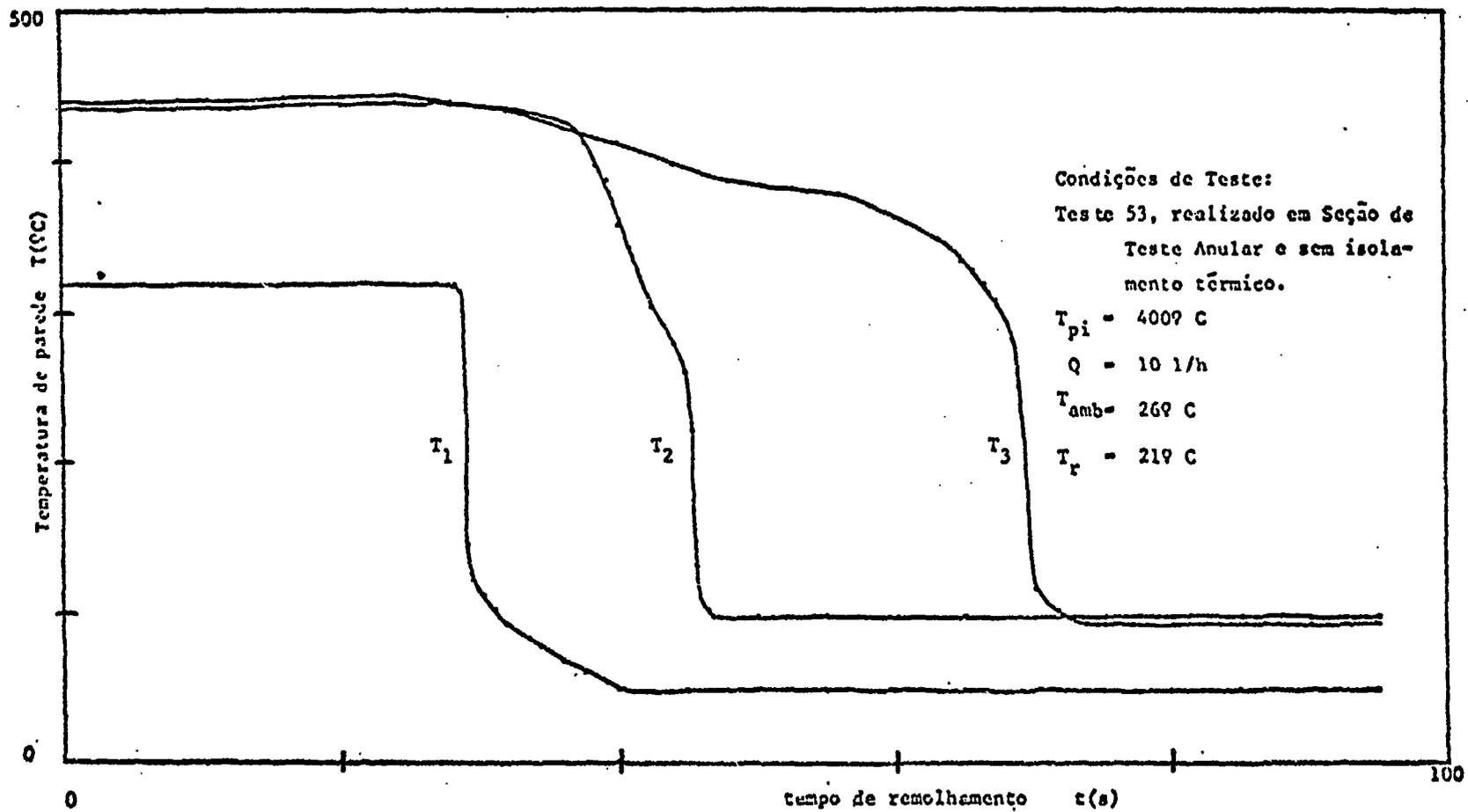


FIGURA IV-8: REGISTRO TÍPICO DOS TERMOPARES DE PAREDE
 (TESTES EM SEÇÃO DE TESTES ANULAR)

CAPÍTULO V

ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 INTRODUÇÃO

Com base nos resultados experimentais apresentados no capítulo anterior e referindo-se às tabelas IV-1, IV-2, V-1 e V-2 são analisadas as influências dos diversos parâmetros no fenômeno do remolhamento que ocorre tanto na seção de testes tubular quanto na seção de testes anular e que foram objeto deste estudo.

Além disso, é feito um confronto com os resultados obtidos por pesquisadores de outros laboratórios que realizaram testes nas mesmas condições em que os deste estudo.

5.2 REPRODUTIBILIDADE DOS TESTES

As FIGURAS V-1 e V-2 mostram, respectivamente, os resultados dos testes 233 e 236 realizados com a seção de testes tubular e os dos testes 53 e 64 realizados com a seção de testes anular. Através deles verifica-se, de maneira bastante clara, que para um conjunto de parâmetros operacionais idênticos há reprodutibilidade dos resultados. Isto não só se evi -

denciou nestes testes das FIGURAS V-1 e V-2 : dos diversos testes realizados, naqueles em que as condições eram praticamente idênticas, essa reprodutibilidade sempre foi muito boa.

5.3 OCORRÊNCIA DE REFRIGERAÇÃO POR ESCOAMENTO DESCENDENTE

A FIGURA V-3 é o exemplo de 2 testes nos quais ocorreu o remolhamento na posição do termopar 4 (T_4) antes de ocorrer na do termopar de nº 3 (T_3). Esse fato ocorreu com os testes realizados, em seção de testes tubular, à baixas vazões, tanto nos testes com isolamento térmica quanto nos realizados sem isolamento. Praticamente, em quase todos os testes realizados à vazão de 02 l/h detetou-se este fato. Com os testes realizados em seção de testes anular esse fato não foi detetado, devido, provavelmente, ao fato de que nesta geometria tal ocorrência estivesse condicionada essencialmente ao elemento externo da seção de testes.

Esse resfriamento precoce da extremidade superior é provavelmente devido à condução axial entre os pontos da parede da seção de testes e à convecção de ar em torno da junção superior dela. A superposição destes processos provoca naquele local a condensação do vapor gerado nas partes inferiores da seção de testes e que ascende àquele local antes da água de refrigeração, porque a velocidade do vapor em relação a essa água é bem maior. Esse vapor condensado inicia um movimento descendente refrigerando, portanto, a seção de testes

no sentido descendente,

Com grande dose de certeza algo semelhante deve ocorrer na extremidade inferior pois lá também ocorre condução axial e convecção de ar. Obviamente na entrada da seção de testes o vapor gerado não se condensa porque não encontra nenhuma região mais fria do que aquela em que foi gerado.

Portanto o fenômeno do remolhamento se caracteriza por apresentar mais de uma frente de molhamento; existem pelo menos 2 frentes de molhamento simultâneas: uma ascendente e outra descendente a partir da extremidade superior da seção de testes o que faz com que o centro dela seja a última parte a ser refrigerada. Este fato também foi relatado por outros pesquisadores como Martini e Premoli (53); Lee, Chen e Groeneveld (77).

Apesar de não detetado nos registros dos testes em seção anular, visualmente pode-se verificar que cada espaçador se comporta como aleta e permite a formação de frentes de molhamento parasitas.

5.4 DISTRIBUIÇÃO TÍPICA DA TEMPERATURA DE PAREDE AO LONGO DA SEÇÃO DE TESTES NO INÍCIO DE UM TESTE

A FIGURA V-4 mostra essa distribuição. Pode-se observar, facilmente, através do confronto das curvas representativas dos testes nessa figura, onde se acha presente o efei

to da condução axial. Esse fato se evidencia no registro da temperatura no início do teste. Para os termopares das extremidades T_1 e T_4 (seção de testes tubular) e T_1 e T_3 (seção de testes anular) essa temperatura é inferior em relação as posições centrais. Isto evidencia que a potência gerada tende a se concentrar na região não refrigerada da seção de testes onde a resistividade elétrica é maior.

Figuras semelhantes a V-4 são apresentadas, entre outros, por Martini e Premoli (53) e Andreoni (20).

5.5 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE PAREDE DURANTE O REMOLHAMENTO

O fenômeno do remolhamento diminui bastante a temperatura de parede pois ele se caracteriza pela queda brusca e acentuada da temperatura (mudança repentina na inclinação da curva de temperatura). Conseqüentemente a resistência elétrica do tubo SANDVIK 316 L de aço inox que constitui a seção de testes, tanto a anular quanto a tubular, diminui enquanto o fenômeno ocorre.

Por causa disto e pelas características do gerador de potência, ocorre uma variação no fluxo de calor que pode ser notada no registro da tensão aplicada à seção de testes (FIGURA V-5). Esse efeito é bastante acentuado tratando-se de seção de testes de aço inoxidável, como é o caso deste trabalho, cujo valor é da ordem de 32% para a variação de temperatura inicial de parede de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o valor $T_{\text{sat}} + \Delta T_{\text{sat}}$

de 110 °C. Esse resultado concorda com Martini e Premoli (53).

5.6 TEMPERATURA DE RETORNO

Somente para vazões realmente baixas (≤ 2 l/h) conseguiu-se observar essa temperatura nos testes realizados com a seção de testes tubular. A sensibilidade dos registradores e as dimensões da seção de testes não permitiam que ela fosse registrada para vazões superiores porque o refrigerante e o vapor formado atingiam a saída do canal da S.T. num intervalo de tempo muito pequeno. Esse fato é mencionado também por Martini e Premoli (53) e Duncan e Leonard (37). Portanto para a Campanha de Testes com a seção de testes anular aumentou-se grandemente a sensibilidade dos registradores e foi possível se detetar a temperatura de retorno.

Observando-se os testes realizados, verifica-se que à medida que a temperatura inicial do revestimento aumenta a temperatura máxima que ele atinge (temperatura de retorno) também aumenta mas a diferença entre as duas diminui (FIGURAS V-6 e V-7). Por outro lado o tempo de retorno (tempo no qual ocorre a temperatura máxima do revestimento) diminui à medida que a temperatura inicial aumenta. Isto significa que o coeficiente efetivo de transferência de calor aumenta à medida que a temperatura inicial aumenta. Estas observações confirmam os resultados de Duncan e Leonard (37).

5.7 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA INICIAL DE PAREDE

O efeito da temperatura inicial de parede pode ser

visto como um fator inibidor da eficiência do remolhamento. Na FIGURA V-8 têm-se a representação gráfica da temperatura inicial de parede contra o tempo de remolhamento para diversos valores da velocidade de injeção de refrigerante. Esse gráfico mostra somente os resultados para a seção de testes tubular pois para cada velocidade de injeção dessa campanha de testes há 4 pontos enquanto que para a campanha com a seção de testes anular há somente 2 pontos. Isto é óbvio pois com a seção de testes tubular foram feitos testes a 300, 400, 500 e 600 °C enquanto que com a seção de testes anular somente a 300 e 400 °C.

Na FIGURA V-8 vê-se, claramente, que o tempo de remolhamento aumenta com o aumento da temperatura inicial de parede, o que equivale a dizer que a velocidade da frente de molhamento diminui com o aumento da temperatura inicial de parede. Esse resultado vem confirmar o obtido por pesquisadores como Martini e Premoli (53); Andrèoni (20); Shires (26); Yamouchi (30); Dua and Tien (78) e Blair (79). Além disso, Hochreiter e Ridle (80) afirmam ainda que para temperaturas superiores a 660 °C esses efeitos da temperatura inicial de parede sobre o remolhamento não são sensíveis porque ela não aumenta significativamente o calor cedido à seção de testes para atingir o valor da temperatura de parede. Contudo, não se pode confirmar esta afirmativa em face ao limite superior imposto a este parâmetro, na presente campanha, notando-se porém uma certa tendência a este fato, em se tratando de vazões mais elevadas, como pode ser visto na FIGURA V-8.

5.8 INFLUÊNCIA DA TAXA DE INJEÇÃO

A taxa de remolhamento da seção de testes aumenta com a velocidade de injeção tanto para a seção de testes tubular (FIGURA V-9) quanto para a seção de testes anular (FIGURA V-10). Cada uma dessas figuras apresenta curvas distintas para os valores iniciais das temperaturas de parede. Essa influência é mais acentuada para valores pequenos da velocidade de injeção de refrigerante ($v_{inj} < 20$ cm/s) (20) (3) (81).

O efeito da velocidade de injeção nos testes em que se tem baixos valores da temperatura inicial de parede (400°C e particularmente 300°C) fica de certa forma mascarado (FIGURAS V-9 e V-10). Isto se deve provavelmente a um resfriamento eficiente por vapor, que faz retornar a temperatura de parede abaixo do valor de "sputtering" antes que a frente de líquido atinja o ponto considerado como referência.

5.9 VELOCIDADE DA FRENTE DE MOLHAMENTO (VELOCIDADE DE FRENTE DE TÊMPERA)

As FIGURAS V-11 e V-12, apresentam a evolução do tempo de molhamento em função da cota. Das figuras, pode-se afirmar que a velocidade da frente de têmpera permanece constante ao longo do comprimento aquecido, tanto para a seção de testes tubular quanto para a anular.

Além disso pode-se afirmar que a velocidade da fren

te de molhamento decresce com o aumento da temperatura inicial de parede.

Estes resultados estão de acordo com Yamanouchi (30) e Thompson (17).

5.10 POTÊNCIA DE AQUECIMENTO DA S.T.

A influência da potência de Aquecimento da seção de testes é apresentada nas FIGURAS V-13 e V-14.

O tempo de molhamento aumenta com o aumento do fluxo, como evidencia a FIGURA V-13. No entanto pode-se, ainda, observar nesta figura e na V-14, que o aumento da velocidade de injeção de refrigerante implica num aumento da velocidade de remolhamento. Portanto a taxa de molhamento varia inversamente com a potência de aquecimento da seção de testes, comprovando os resultados de Lee (77), Andréoni (20) e Duncan e Leonard (37).

5.11 TEMPERATURA FINAL DE PAREDE (T_{pf})

Depois que a frente de molhamento passou pela posição do termopar, que registra o histórico da temperatura naquele ponto, a temperatura ali está abaixo da Temperatura de Leiden - frost. A parede, que a partir deste momento tem um contato constante com o refrigerante, pode apresentar um valor de temperatura final de parede (T_{pf}) abaixo do da temperatura de saturação naquele local naquelas condições. Isto ocorre devido ao

subresfriamento do refrigerante (temperatura de entrada do refrigerante na seção de testes) e ao contato constante que fazem com que consideráveis quantidades de calor sejam transferidas, por convecção forçada, ao líquido refrigerante, em regime de escoamento monofásico.

5.12 TESTES DE VISUALIZAÇÃO

Alguns testes de visualização foram realizados e mostraram que aparecem 2 tipos diferentes de configuração de regimes de escoamento durante o remolhamento ascendente (FIGURA V-15).

Ao se observar uma dada elevação onde o remolhamento está começando, ocorre, nesse ponto, uma pré-refrigeração por vapor superaquecido seguida pela pré-refrigeração por vapor com gotas de líquido dispersas: o diâmetro das gotas cresce até formar camadas de líquido. Em consequência existe a região de remolhamento da parede seguida de uma outra, pequena, de ebulição nucleada. Nesse caso a frente de molhamento é muito estável e ascende vagarosamente, apresentando, algumas vezes, assimetrias devido ao acabamento da superfície ou deformações do tubo.

No entanto, para alguns casos (baixo fluxo, baixas velocidades) ocorre o remolhamento da parede quando o escoamento ainda é anular. Forma-se uma película muito fina de líquido cuja fronteira é instável e frequentemente apresenta os

cilação; é o fenômeno análogo ao "dryout" e que pode explicar algumas flutuações da temperatura. Esta segunda forma de remolhamento foi observada para o caso de remolhamento prematuro nas vizinhanças dos espaçadores quando aparecem a frente ascendente e a descendente, na geometria anular.

SEÇÃO DE TESTES, TUBULAR																				
v_1	TEMPERATURA 600°C				TEMPERATURA 500°C				TEMPERATURA 400°C				TEMPERATURA 300°C				TEMPERATURA 300°C TESTE COM ISOL. TÉRMICO			
	T_{p1}	T_{p2}	T_{p3}	T_{p4}	T_{p1}	T_{p2}	T_{p3}	T_{p4}												
06	570	585	598	562	447	460	518	455	351	391	391	366	305	330	332	306	264	299	330	295
10	587	609	611	579	456	469	519	461	342	381	391	371	261	301	319	278	253	288	319	259
20	585	571	607	499	475	480	527	479	352	371	392	357	287	321	328	298	256	307	338	275
40	589	589	609	594	480	497	536	472	396	401	406	386	302	317	337	312	254	317	349	257

SEÇÃO DE TESTES ANULAR						
v_1	TEMPERATURA 400°C			TEMPERATURA 300°C		
	T_{p1}	T_{p2}	T_{p3}	T_{p1}	T_{p2}	T_{p3}
2,28	298	396	389	230	318	342
3,80	318	440	435	230	313	396
7,60	333	440	440	264	337	222
15,20	328	445	394	249	303	240

v_1 = velocidade de injeção do refrigerante (cm/s)

T_{pn} = temperatura inicial da parede na posição do termopar n (°C)

TABELA V - 1 : TEMPERATURA INICIAL DA PAREDE NA POSIÇÃO DO TERMOPAR n

SEÇÃO DE TESTES TUBULAR																				
v_1	TEMPERATURA 600 °C				TEMPERATURA 500 °C				TEMPERATURA 400 °C				TEMPERATURA 300 °C				TEMPERATURA 300 °C TESTE COM ISOL. TÉRMICO			
	t_{q1}	t_{q2}	t_{q3}	t_{q4}	t_{q1}	t_{q2}	t_{q3}	t_{q4}												
0,6	33,23	45,38	129,08	203,70	25,59	39,43	83,29	89,49	2,20	7,80	52,43	101,50	22,94	29,02	76,48	120,04	23,55	26,23	47,67	67,10
1,0	29,17	26,05	59,66	186,55	17,23	22,78	47,26	89,50	0,67	3,01	7,50	35,89	7,91	8,68	42,38	80,12	8,68	9,70	15,32	36,98
2,0	7,35	11,47	32,35	57,35	7,92	12,29	27,31	57,08	0,42	0,84	5,42	16,07	5,87	7,15	10,72	22,60	7,87	8,51	12,34	29,79
4,0	3,29	0,88	12,74	26,51	3,87	5,71	17,14	28,24	0,40	0,67	2,09	9,97	3,85	4,35	9,54	24,44	3,19	3,70	6,89	16,09

v_1 = velocidade de injeção do refrigerante (cm/s)
 t_{qn} = tempo de molhamento na posição do termopar n (s)

SEÇÃO DE TESTES ANULAR						
v_1	TEMPERATURA 400 °C			TEMPERATURA 300 °C		
	t_{q1}	t_{q2}	t_{q3}	t_{q1}	t_{q2}	t_{q3}
2,28	54,08	85,76	137,45	51,76	61,76	91,96
3,80	29,48	47,61	69,32	27,89	35,37	55,12
7,60	14,90	28,24	35,95	14,05	22,44	31,15
15,20	7,58	16,73	19,15	7,12	10,59	16,54

TABELA V - 2 : TEMPO DE MOLHAMENTO NA POSIÇÃO DO TERMOPAR n

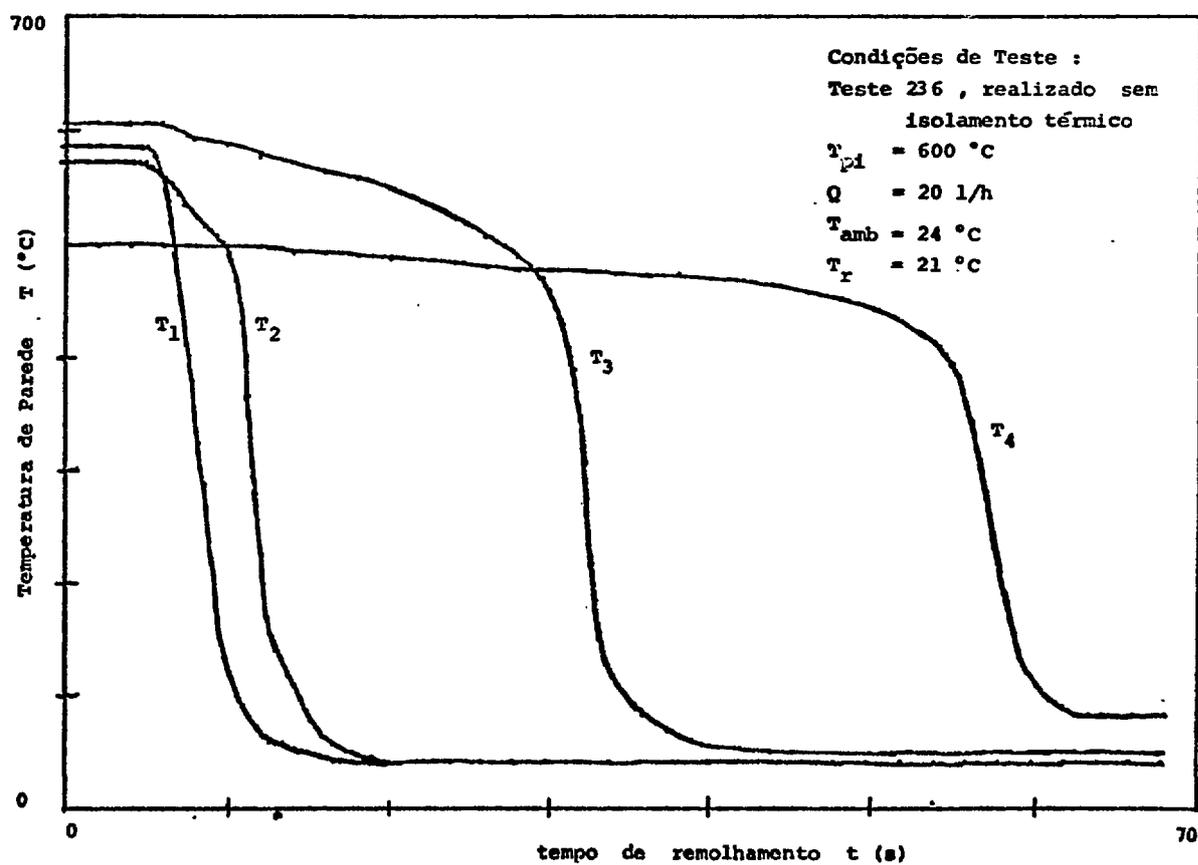
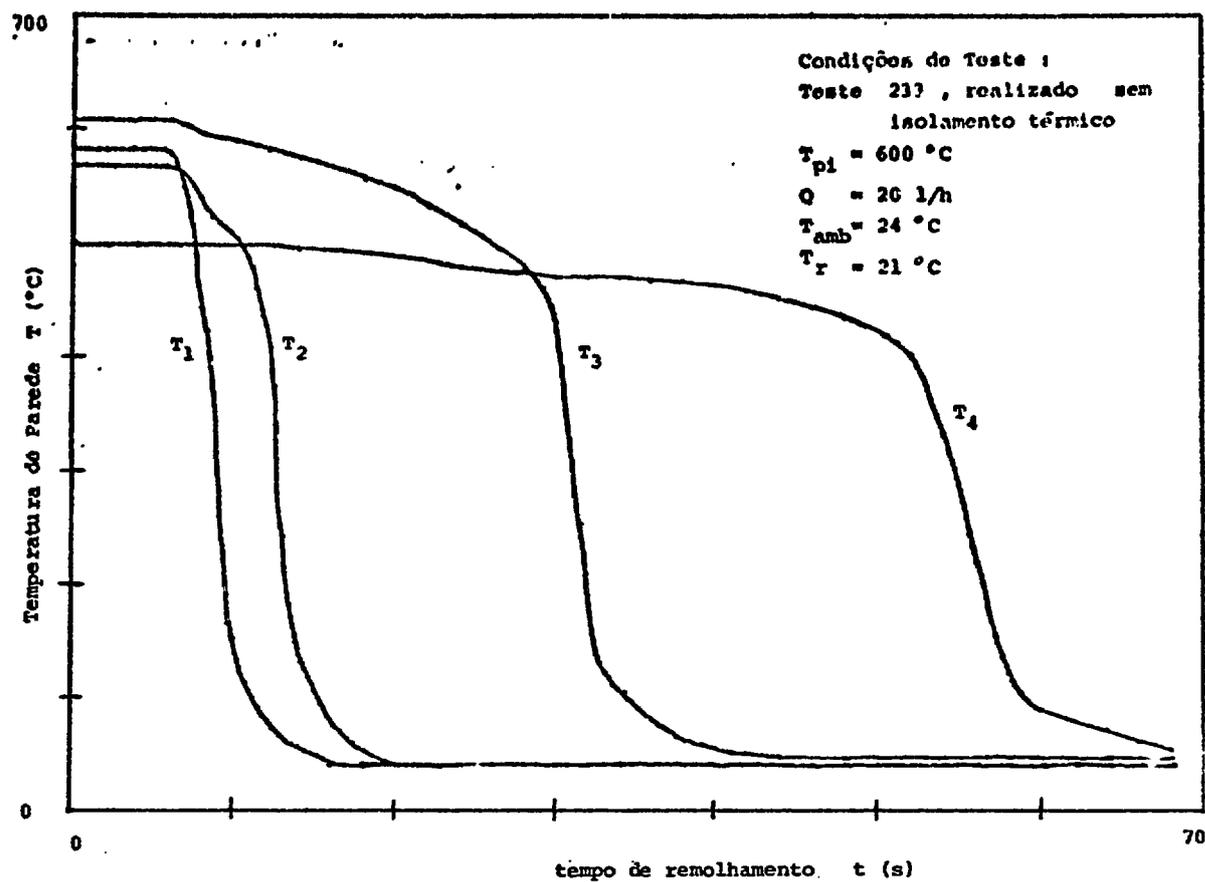


FIGURA V-1: REPRODUTIBILIDADE DOS TESTES REALIZADOS COM A SEÇÃO DE TESTES TUBULAR

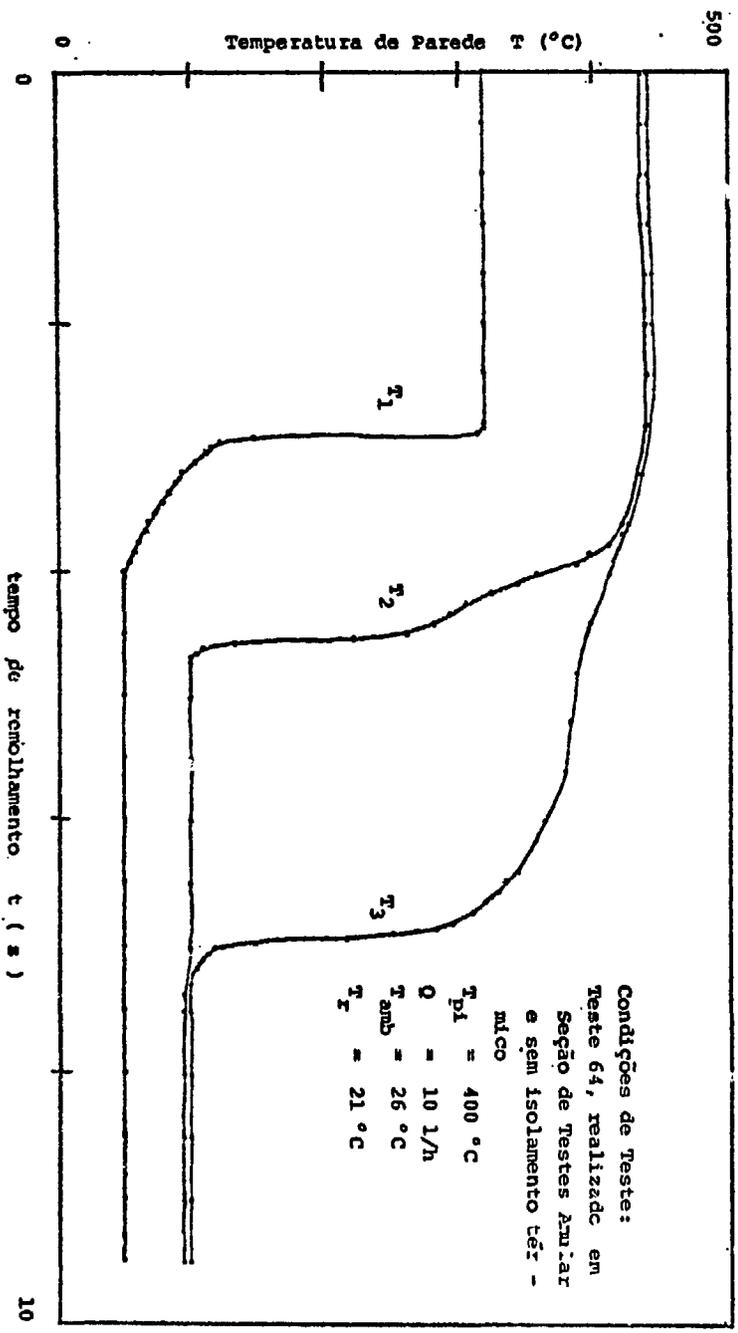
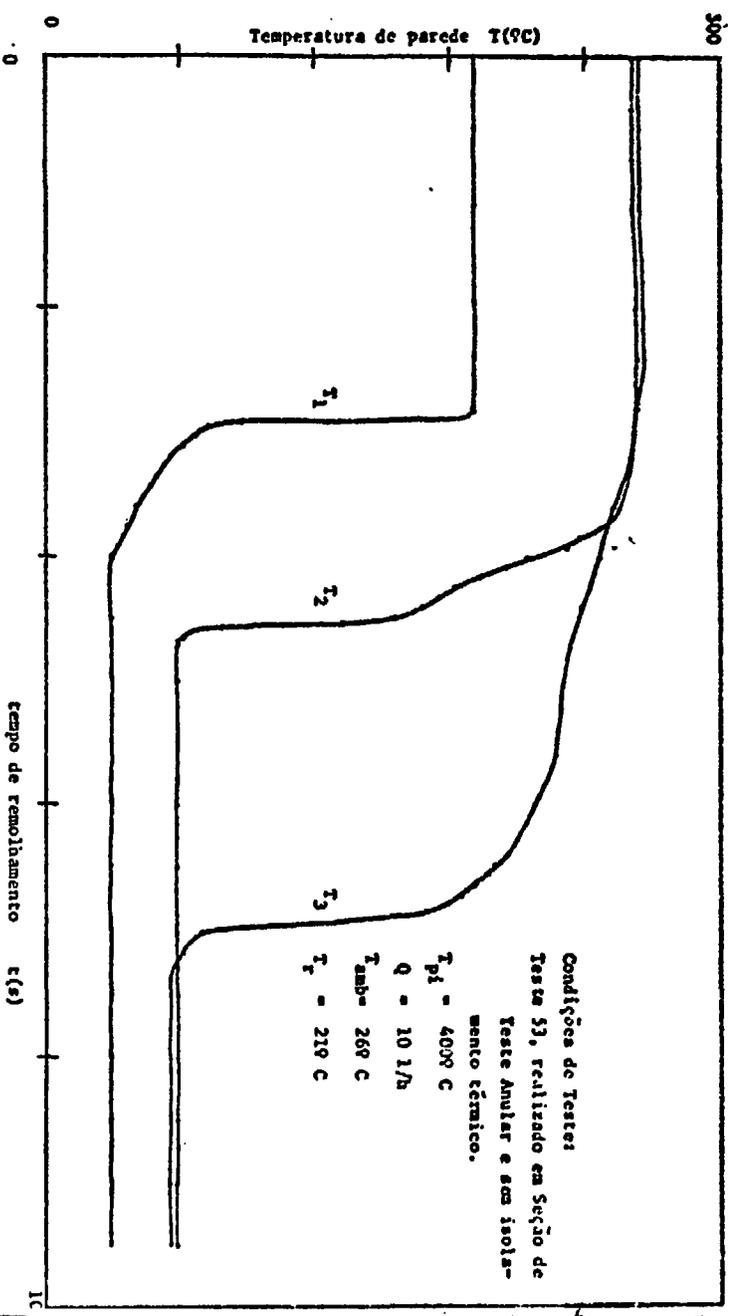


FIGURA V-2: REPRODUTIBILIDADE DOS TESTES REALIZADOS COM A
 SEÇÃO DE TESTES ANULAR

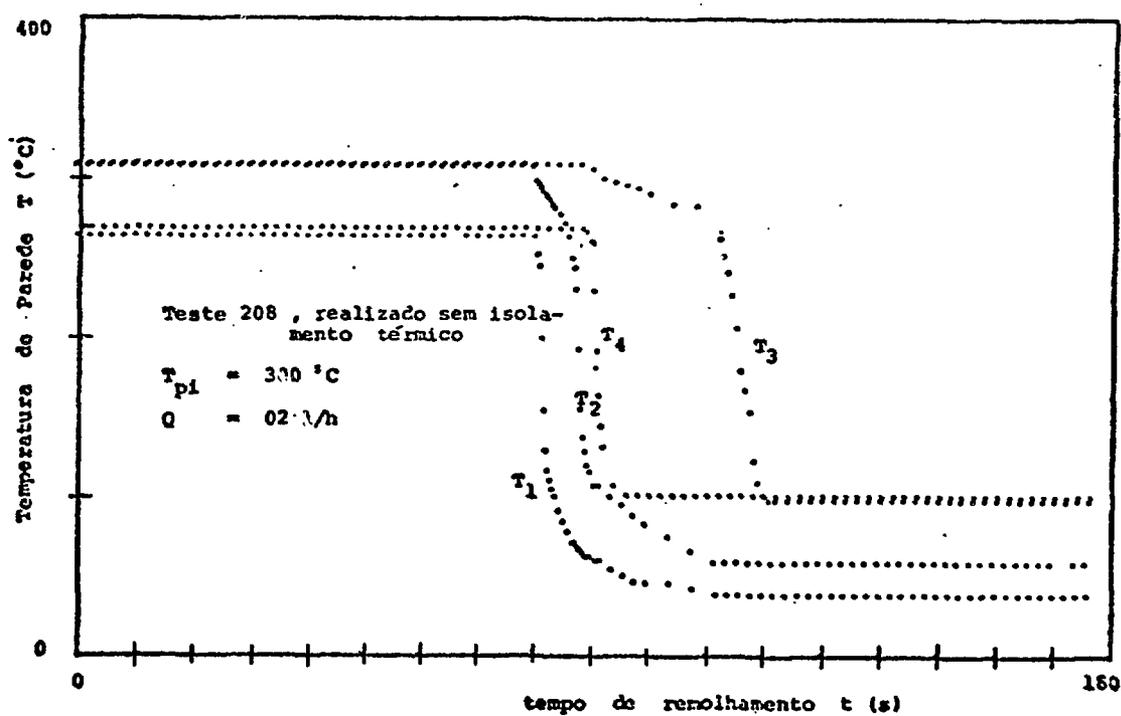
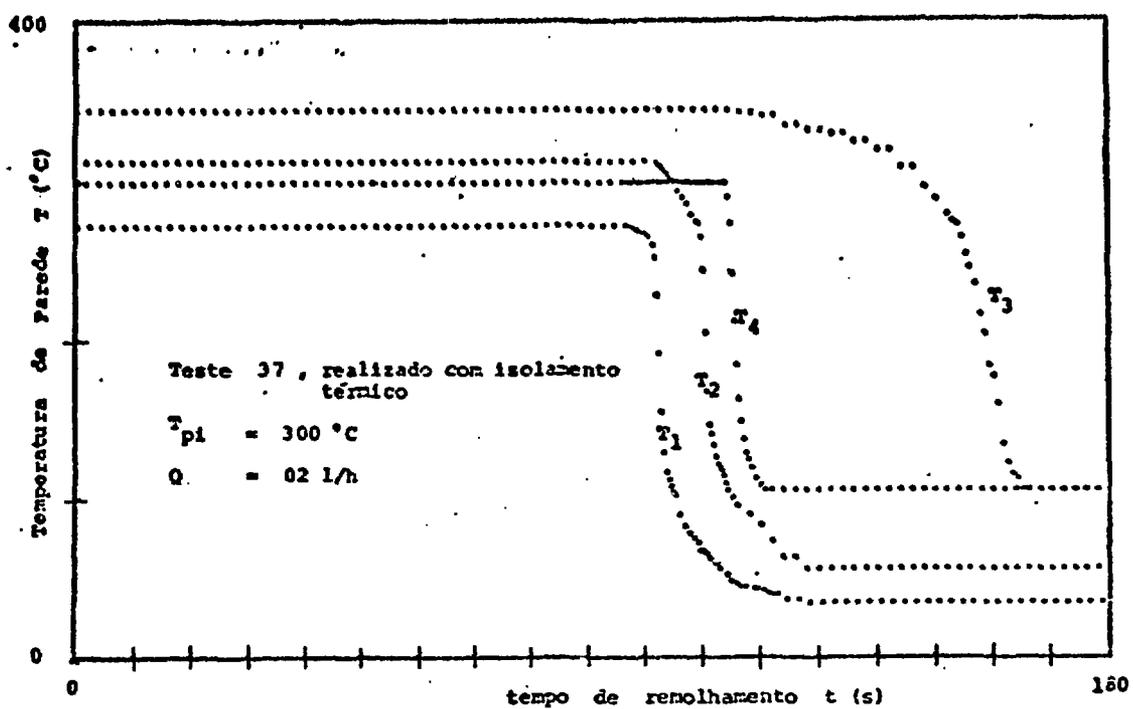


FIGURA V-3: REFRIGERAÇÃO DE T_4 POR ESCOAMENTO DESCENDENTE

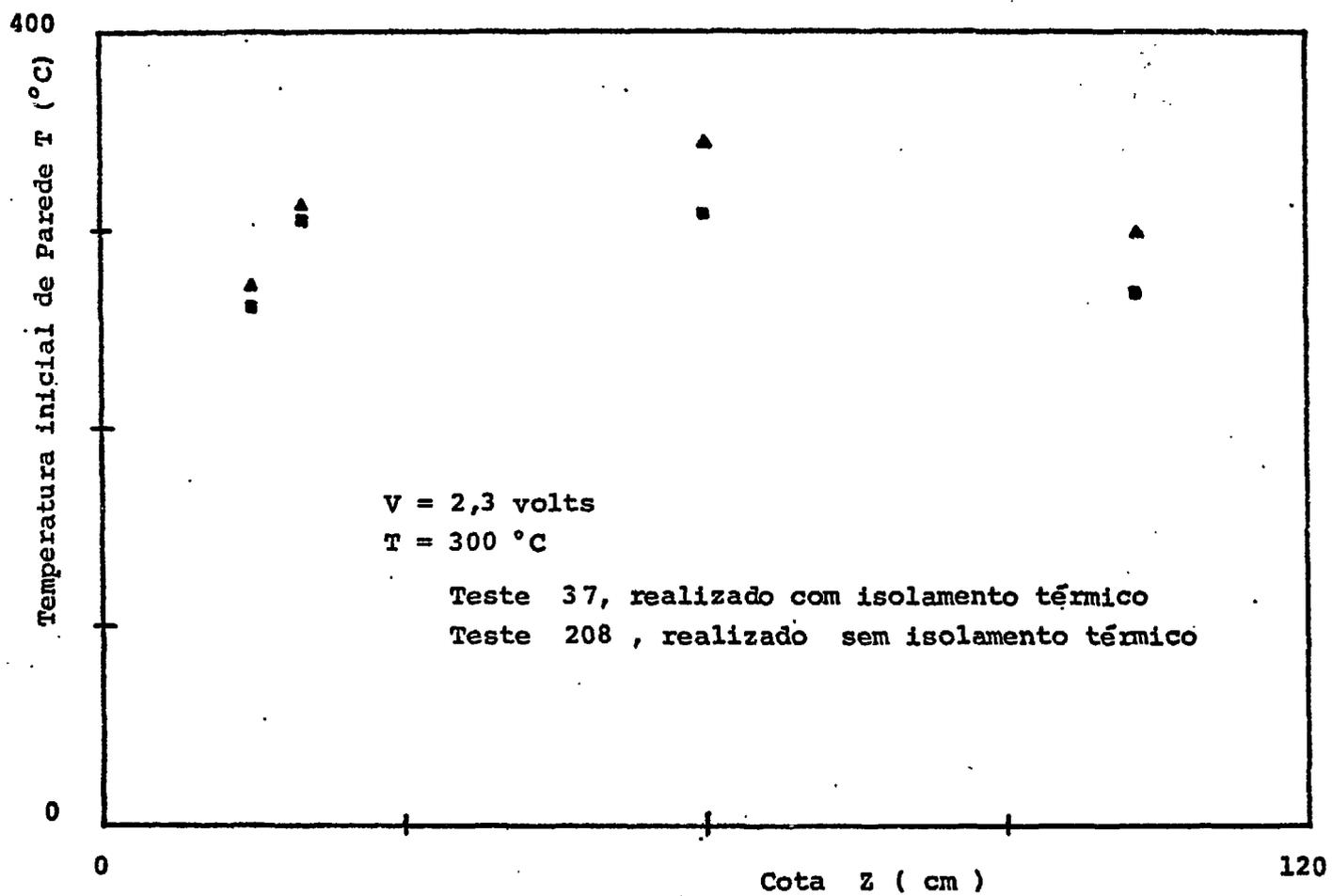


FIGURA V-4: DISTRIBUIÇÃO TÍPICA DA TEMPERATURA DE PAREDE AO LONGO DA S.T. NO INÍCIO DO TESTE

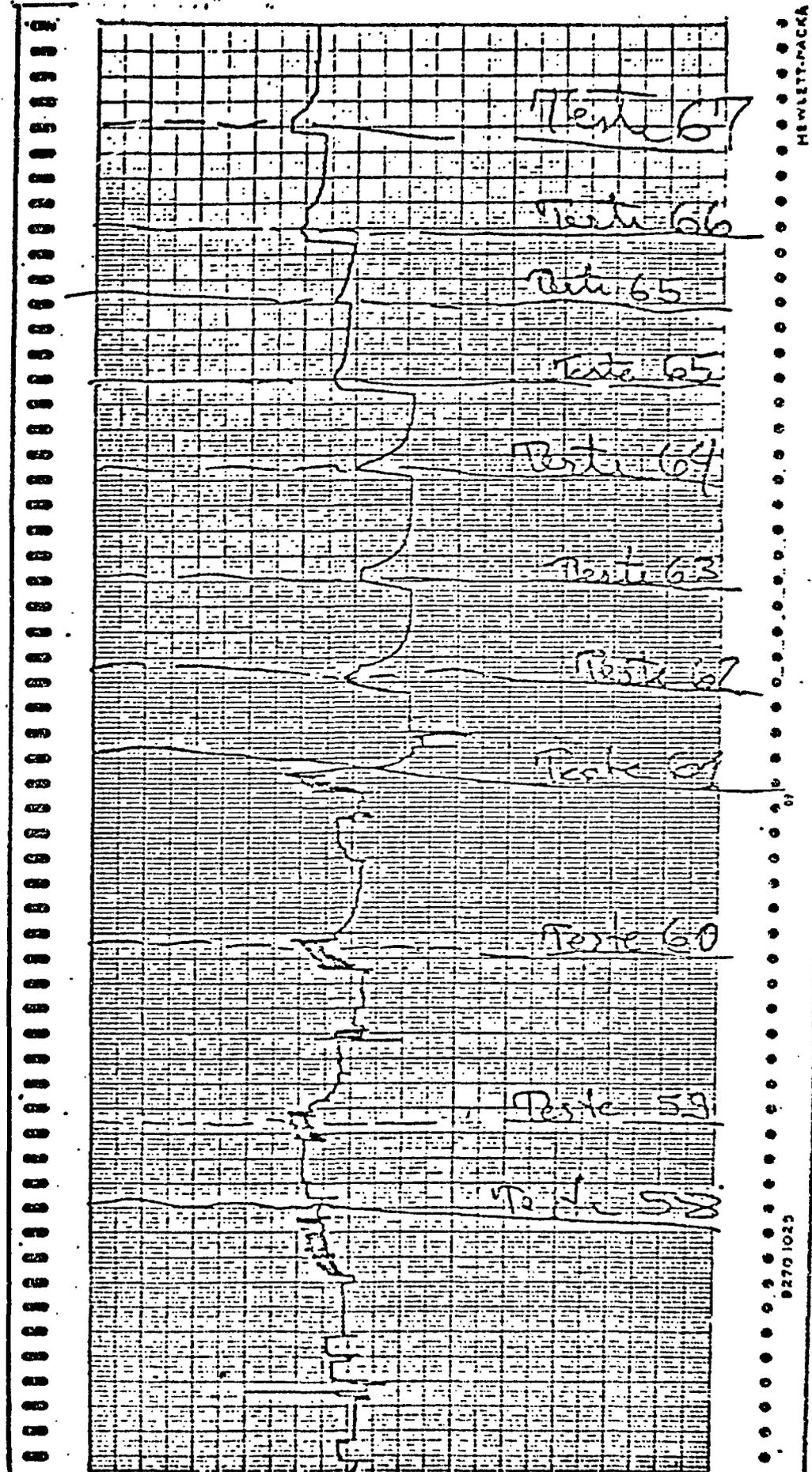


FIGURA V-5: VARIAÇÃO DA TENSÃO APLICADA À SEÇÃO DE TESTES

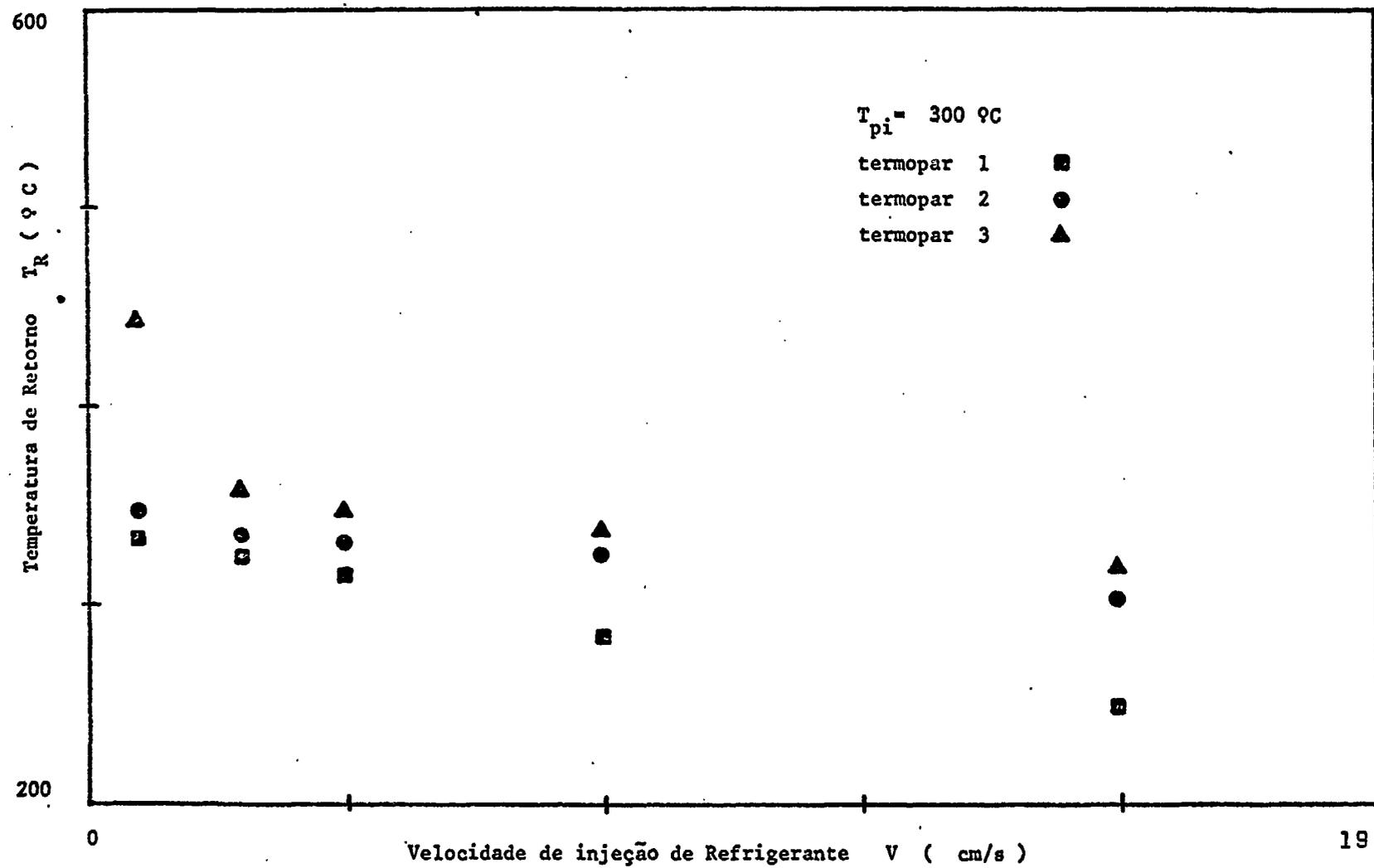


FIGURA V-6: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DE RETORNO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE INJEÇÃO

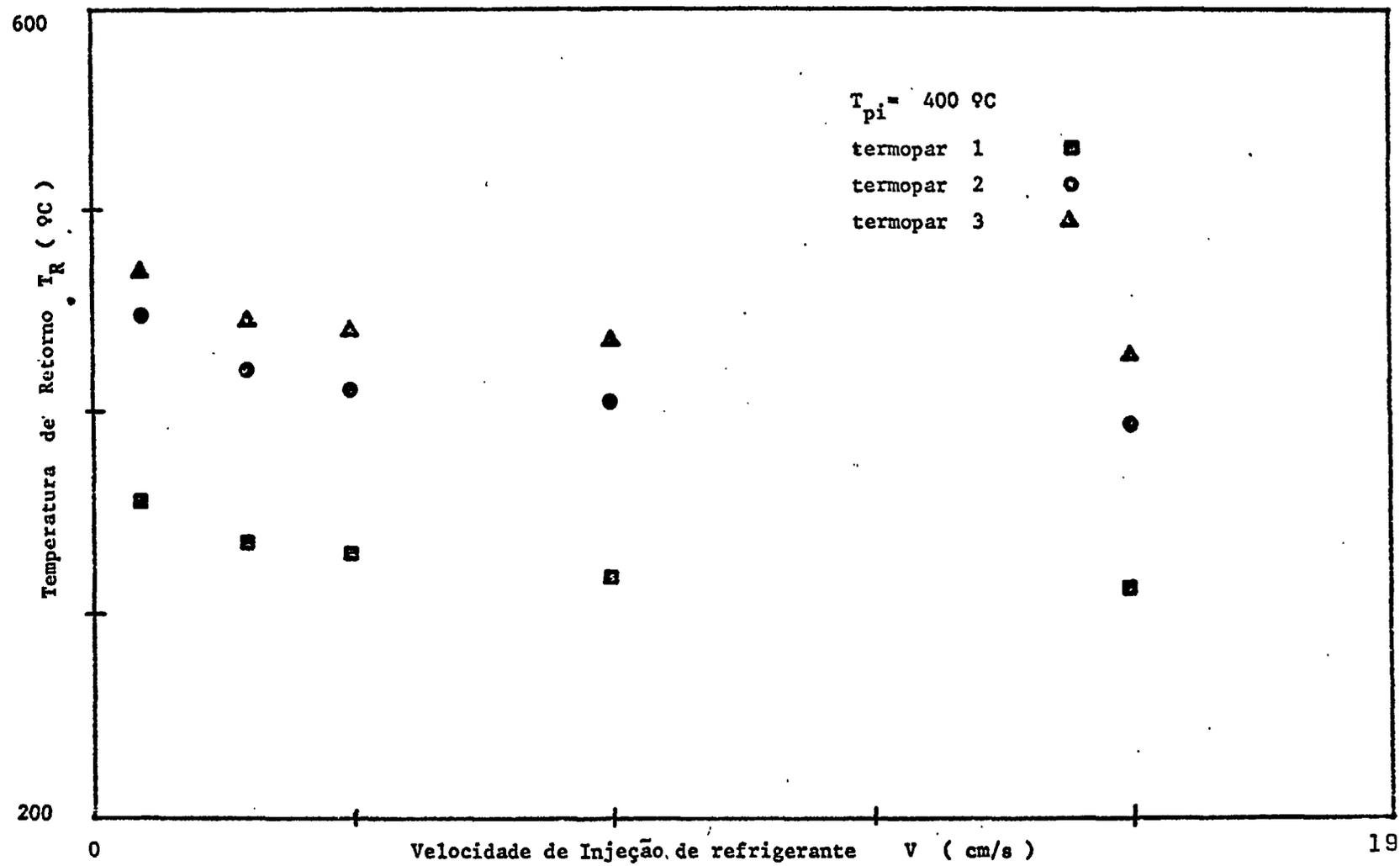


FIGURA V-7: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DE RETORNO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE INJEÇÃO

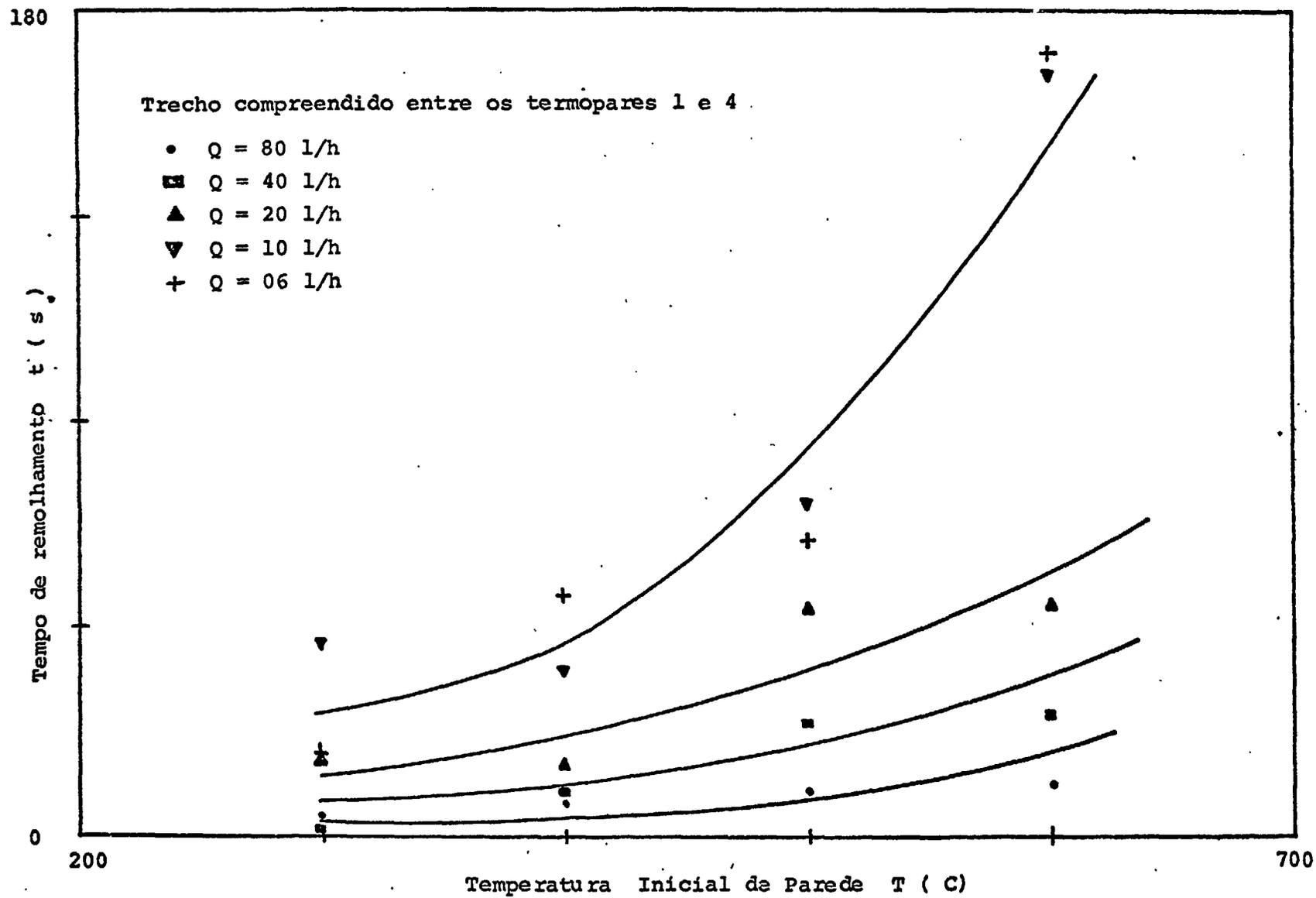


FIGURA V-8: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA INICIAL DE PAREDE SOBRE O TEMPO DE REMOLHAMENTO
(TESTES REALIZADOS EM SEÇÃO DE TESTES TUBULAR)

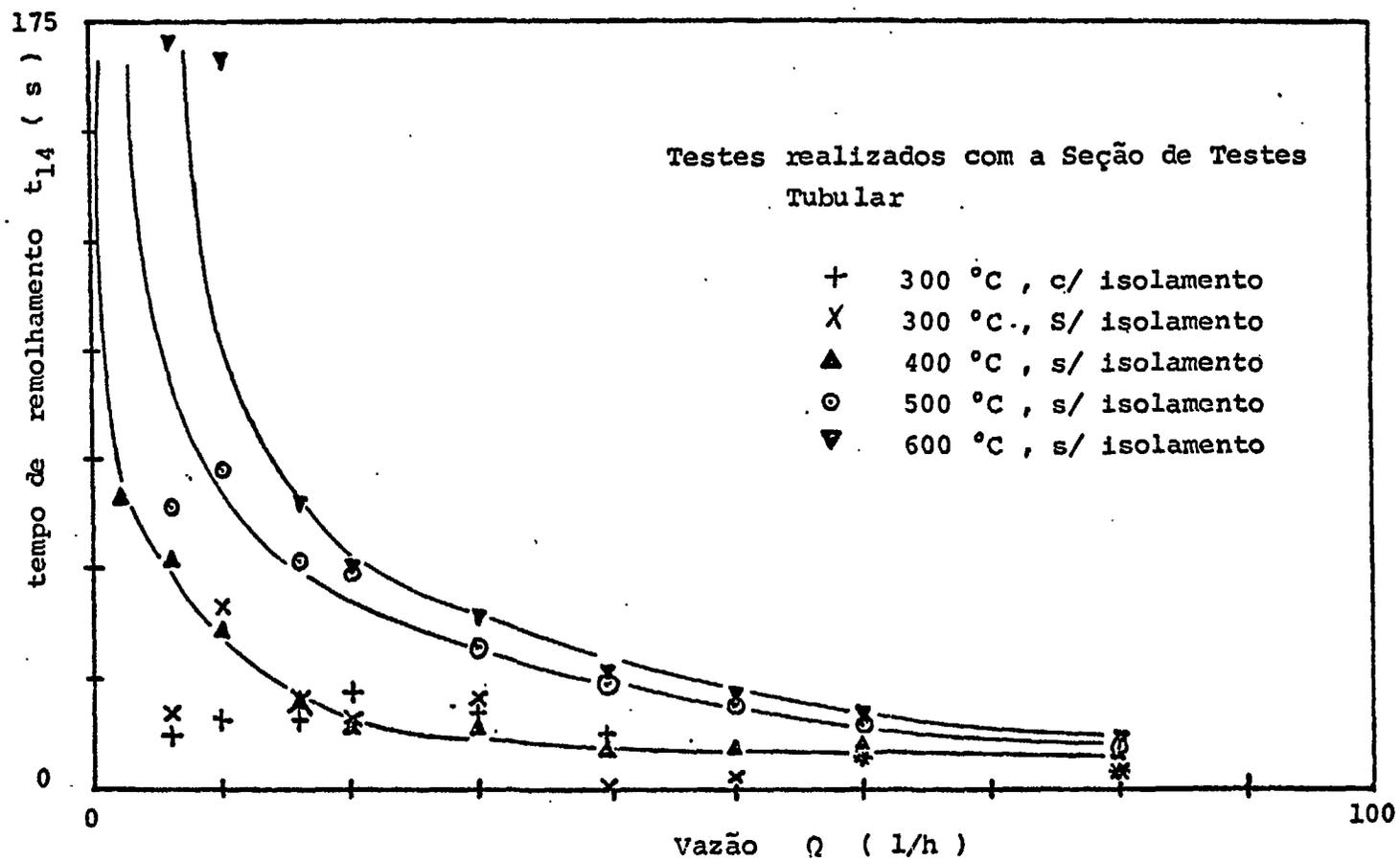


FIGURA V-9: INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE REFRIGERANTE NO TEMPO DE REMOLHAMENTO

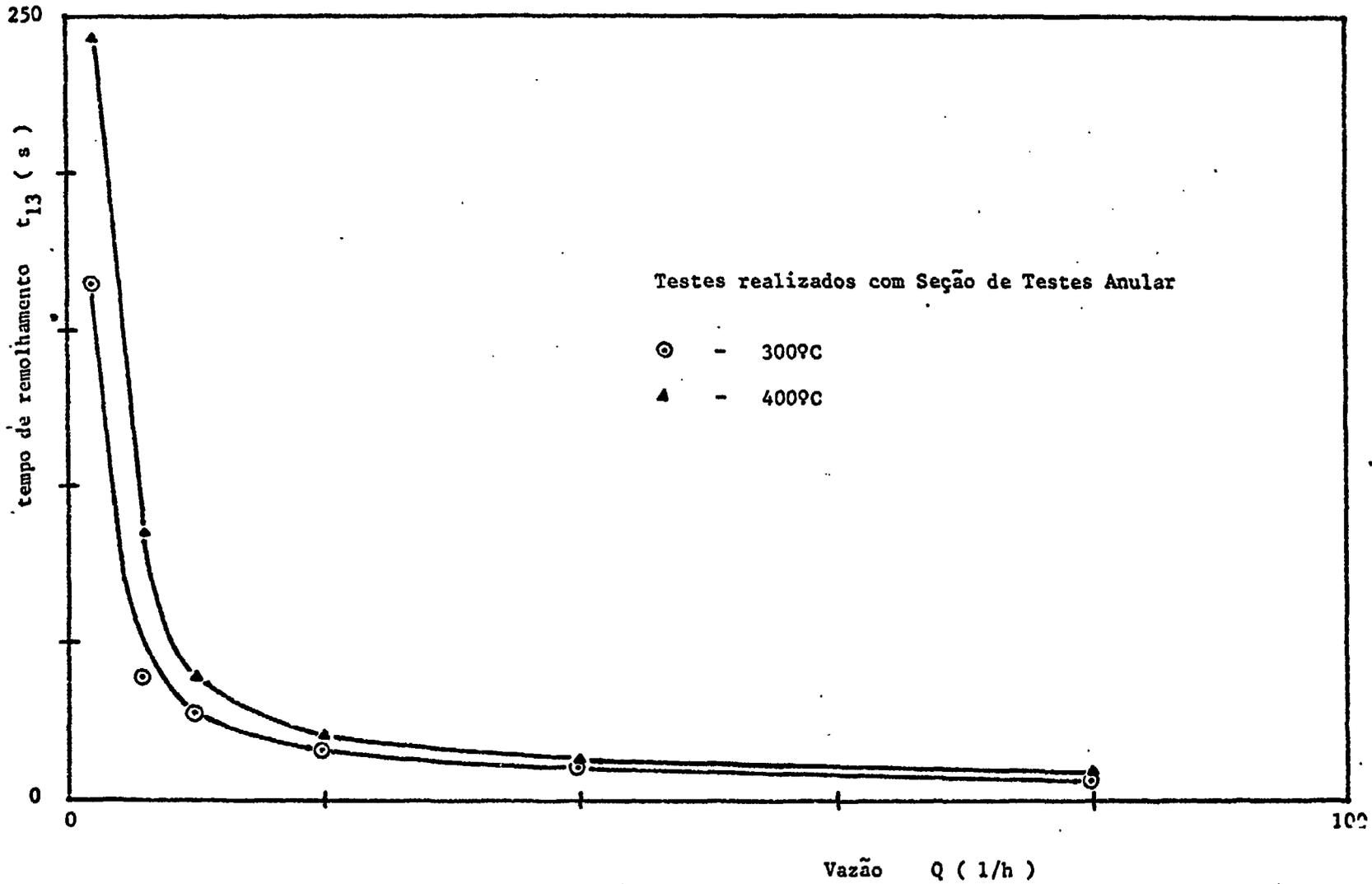


FIGURA V-10: INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE REFRIGERANTE NO TEMPO DE REMOLHAMENTO

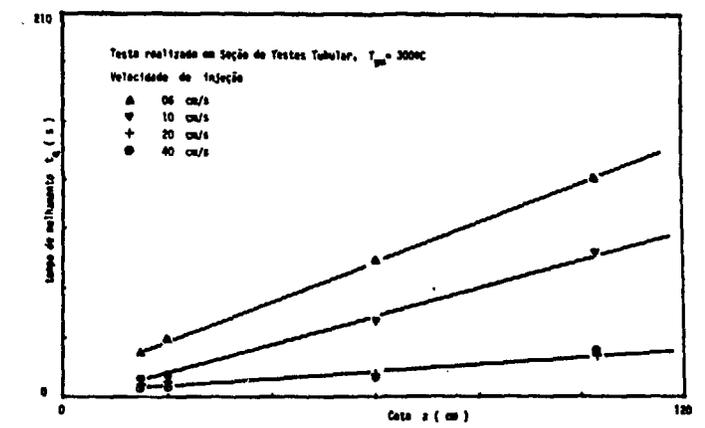
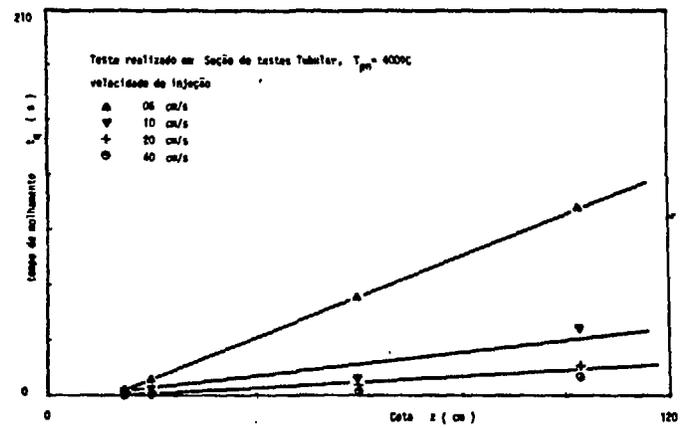
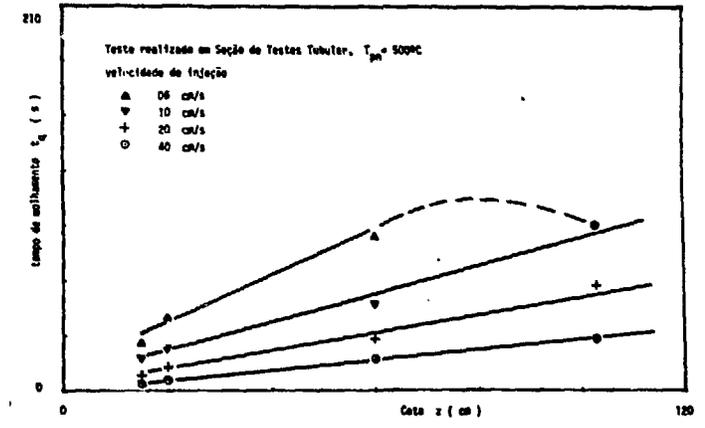
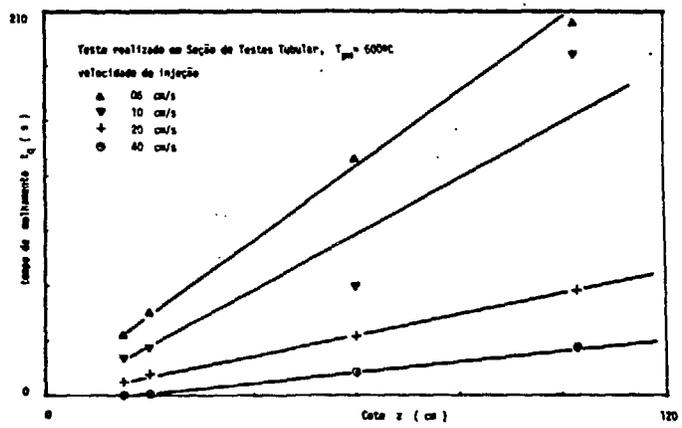


FIGURA V-11: EVOLUÇÃO DO TEMPO DE REMOLHAMENTO EM FUNÇÃO DA COTA

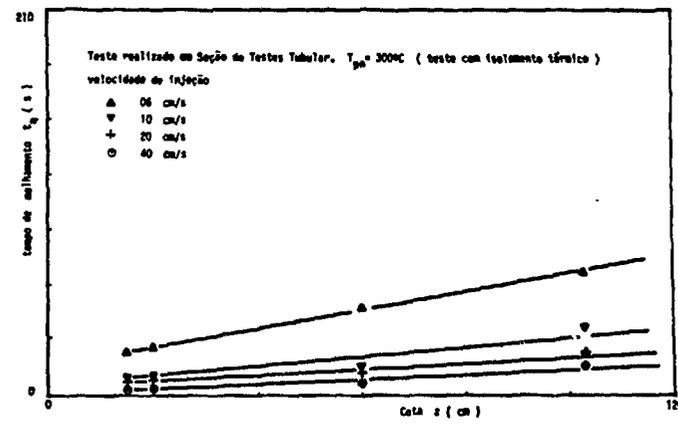
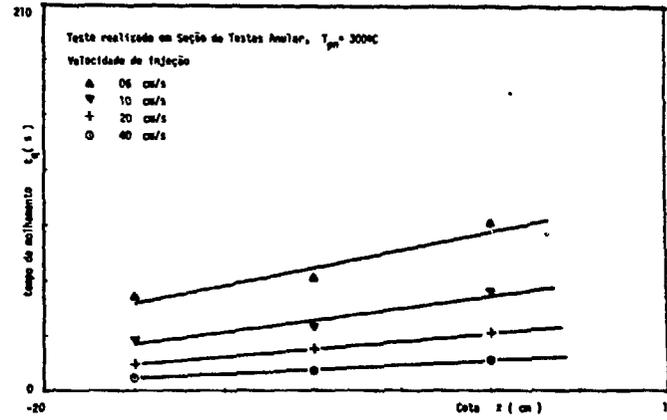
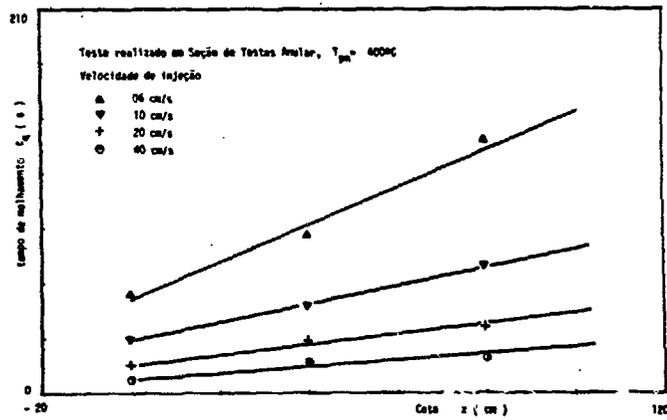


FIGURA V-12: EVOLUÇÃO DO TEMPO DE REMOLHAMENTO EM FUNÇÃO DA COTA

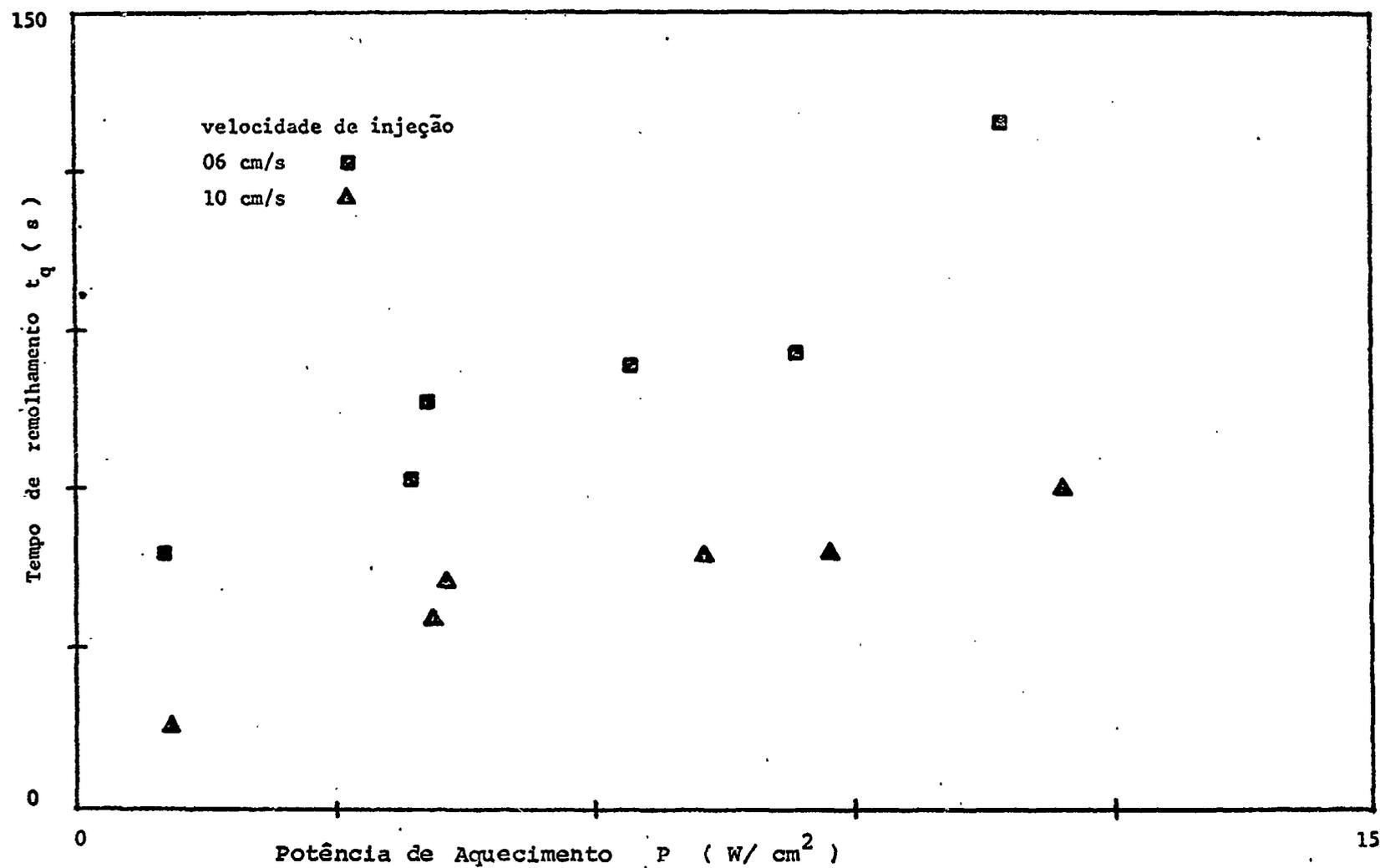


FIGURA V-13: INFLUÊNCIA DA POTÊNCIA DE AQUECIMENTO DA SEÇÃO DE TESTES E DA VELOCIDADE DE INJEÇÃO SOBRE O TEMPO DE REMOLHAMENTO

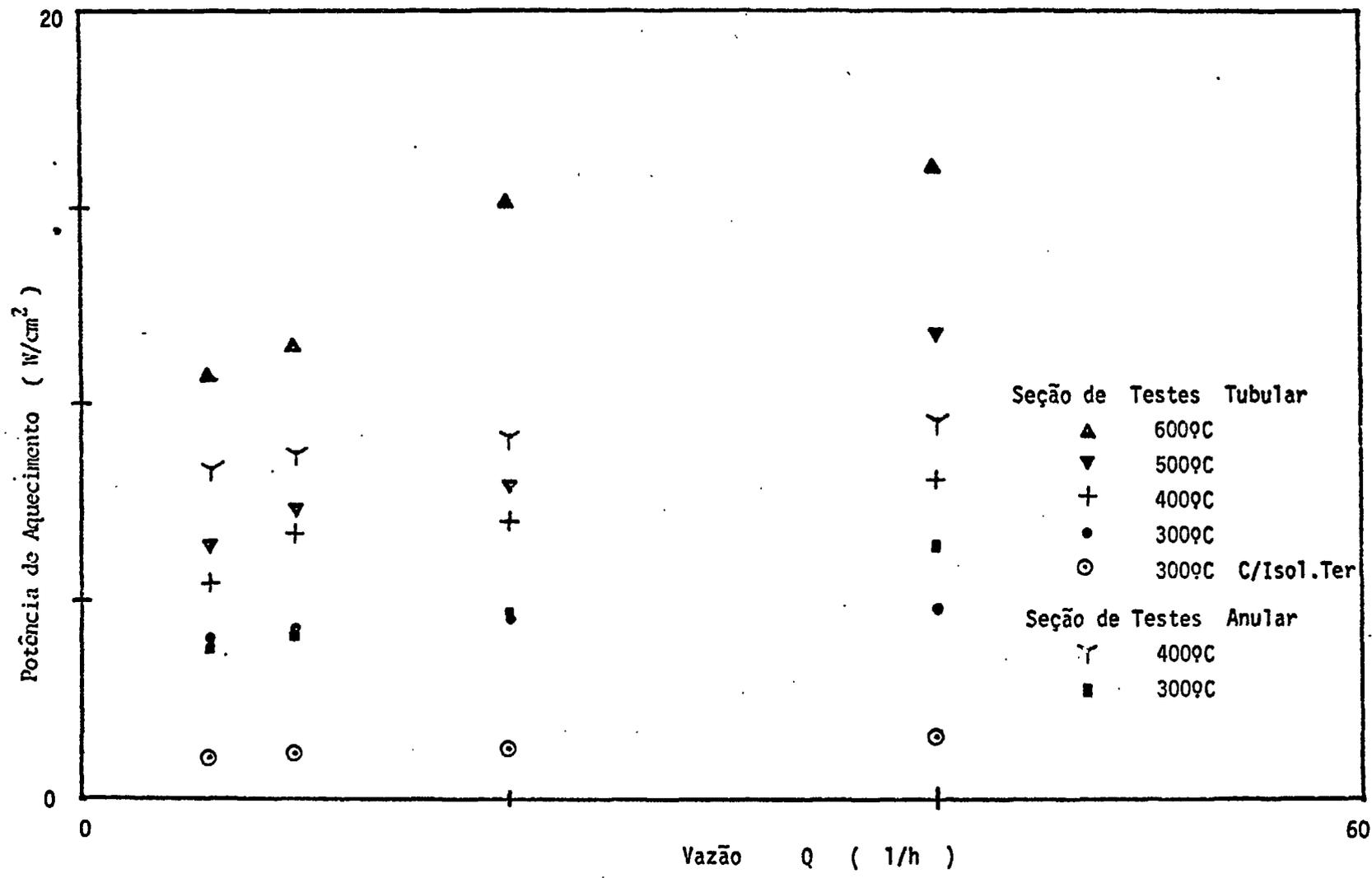


FIGURA V-14: RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA DE AQUECIMENTO DA SEÇÃO DE TESTES E A VAZÃO DE REFRIGERANTE

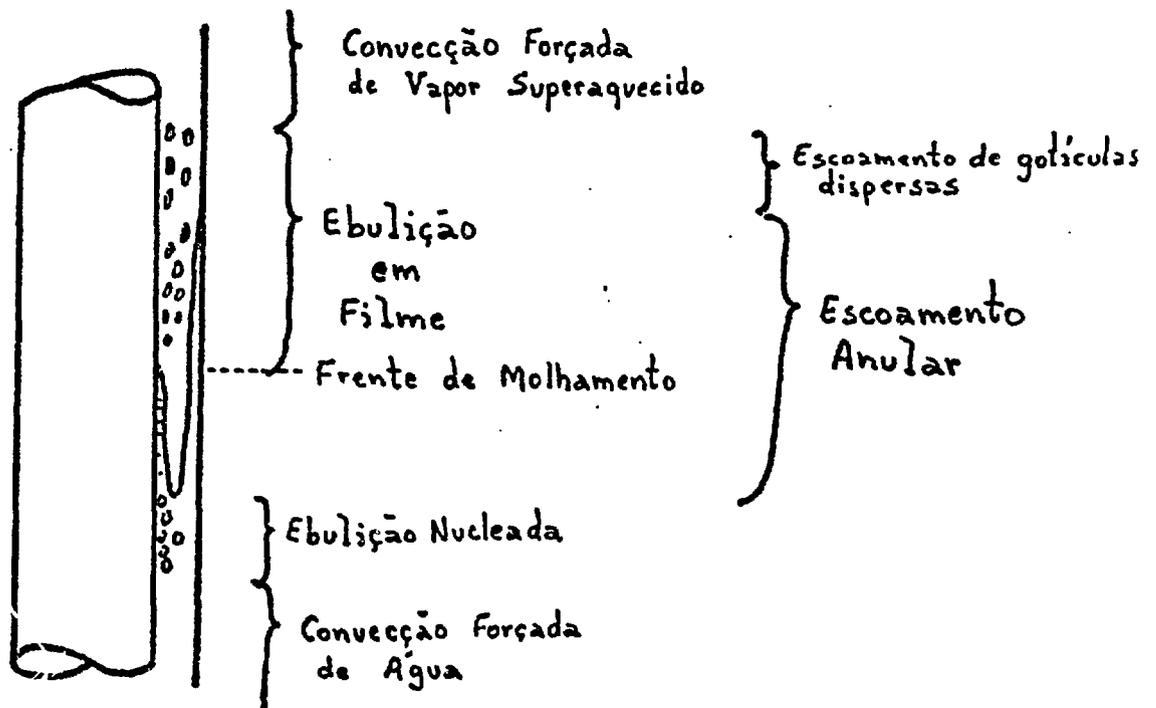
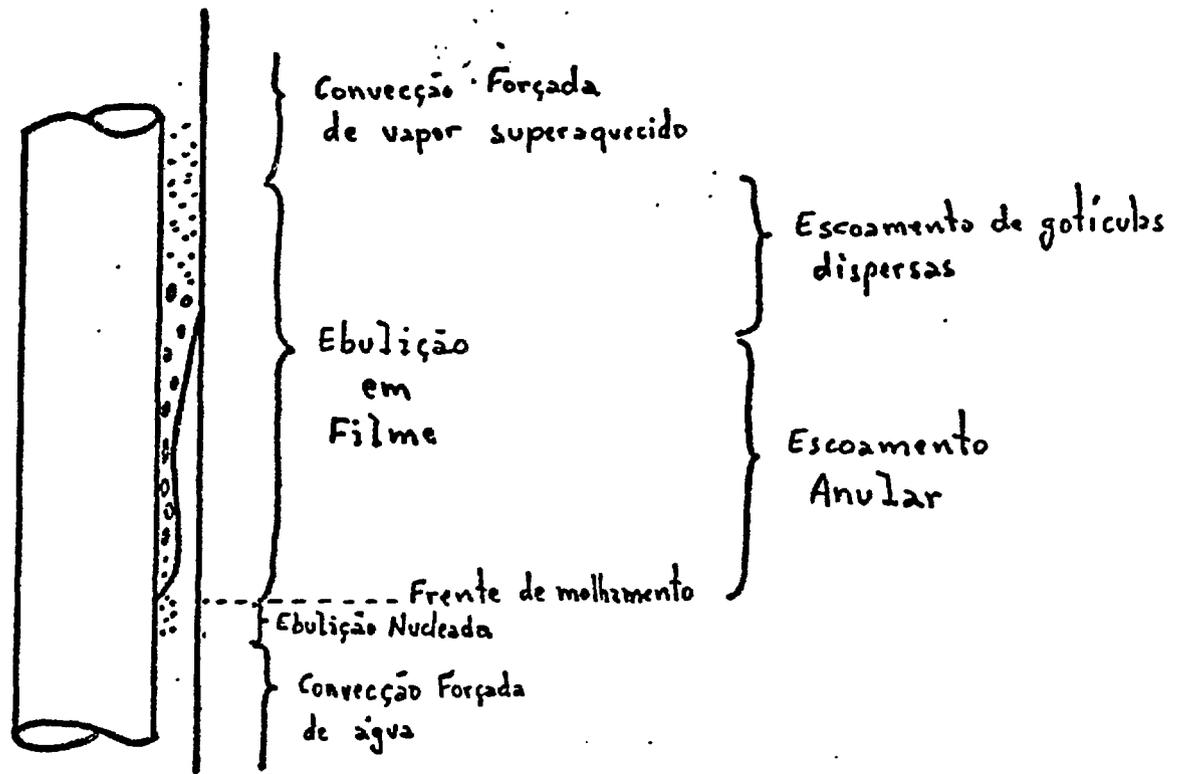


FIGURA V-15: CONFIGURAÇÃO DOS REGIMES DE ESCOAMENTO DURANTE O REMOLHAMENTO ASCENDENTE

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

O estudo bibliográfico inicial permitiu que fosse possível avaliar a situação das pesquisas a respeito de refrigeração de emergência. O aumento, de ano para ano, no número de publicações e experimentos que se realizam sobre este assunto, mostram uma tomada de consciência, de âmbito mundial, sobre a importância dos problemas de segurança dos reatores a água.

Neste trabalho que inicialmente visava aspectos qualitativos do problema, conseguiu-se verificar relações entre alguns parâmetros envolvidos e, mesmo, confirmar os resultados encontrados por outros pesquisadores. No entanto, devido essencialmente à inadequação do dispositivo experimental, bem como à instrumentação disponíveis, alguns parâmetros deixaram de ser medidos.

É interessante que se prossiga com a realização de testes para estudar a influência da natureza dos materiais da parede, em particular a presença ou não de camadas de óxido que podem mudar o coeficiente de transferência de calor bem como a temperatura de LEIDENFROST. Também é necessário que seja examinada a influência da geometria sobre o fenômeno do remolhamento, uma vez que as correlações que existem foram estabelecidas unica-

mente para certas geometrias.

Durante o desenvolvimento das campanhas de testes , conseguiu-se certa familiarização no que se refere à natureza do fenômeno abordado, bem como à velocidade de propagação dos parâmetros envolvidos. Como decorrência surge naturalmente a necessidade de se projetar e construir um circuito especificamente para experiências de remolhamento.

O circuito para os testes de remolhamento além de monitorar os parâmetros deste trabalho, através de instrumentação e sistema de coleta de dados projetados adequadamente para a detecção específica dos parâmetros envolvidos, deve incluir:

- 1 - possibilidade de troca fácil da seção de testes por outras de geometrias variadas, como por exemplo, seções de testes tubular com vários comprimentos, com várias espessuras de parede e constituídas por materiais diferentes; seções de testes com arranjo em feixe; seções de testes anular para experimentos visuais. Deve-se procurar adotar para as seções de testes materiais que não apresentem dependência acentuada da resistividade com a temperatura, visando a obtenção de fluxos de calor mais estáveis durante o processo do remolhamento, como por exemplo inconcl. Os termopares das seções de teste devem

ser fixados por uma forma distinta de solda prata e o material isolante térmico delas deve ser escolhido de tal maneira que se possa atingir altos níveis de temperaturas de superfície (da ordem de 1000°C).

- 2 - um sistema de controle de pressão em presença de atmosfera de vapor.
- 3 - um sistema de alimentação de água que permita o controle fino da temperatura de injeção na faixa de atuação dos sistemas de refrigeração de emergência de um PWR.
- 4 - um sistema de coleta de dados com elevada capacidade de armazenagem e velocidade compatível com o fenômeno (acompanhamento da variação de temperatura de superfície durante o processo do remolhamento).

Do estudo bibliográfico, nota-se ainda que um implemento aos modelos de cálculo do remolhamento pode ser dado com a realização de um número cada vez maior de testes. Não só testes básicos como é o caso deste trabalho, mas testes integrais onde se possa estudar, por exemplo, os efeitos tridimensionais da distribuição de potência e de temperatura inicial de parede sobre o fenômeno do remolhamento.

Certamente, a realização, a análise e a comparação

destes testes com as situações que podem ocorrer a um reator PWR, conduzirão a pesquisa no sentido de se desenvolver melhores técnicas para cálculos de refrigeração em presença de re molhamento. Um programa experimental vinculado a um programa analítico através do desenvolvimento de código de cálculo pró prio, ou pela utilização de códigos disponíveis, gera maior confiabilidade nos sistemas de avaliação do comportamento de reatores de potência em presença do acidente de perda de refrigerante.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- (1) 10 CFR 50, Appendix A, "General Design Criteria for Nuclear Power Plants", Code of Federal Regulations Title 10, Atomic Energy Commission, Part 50, Licensing of Production and Utilization Facilities, Appendix A, General Design Criteria for Nuclear Power Plants
- (2) 10 CFR 50, Appendix K, ECCS Evaluation Models, Code of Federal Regulations, Title 10, Atomic Energy Commission, Part 50, Licensing of Production and Utilization Facilities.
- (3) BUTTERWORTH, D., OWEN, R.G. "The Quenching of Hot Surfaces by top and Bottom flooding. A review. ETPFG-Meeting Haifa (1975).
- (4) HSU, Y.Y.; SULLIVAN, H; Thermal - Hydraulic Aspects for PWR Safety Research, IN: Light Water Reactor . Symposium on the Thermal and Hydraulic Aspects of Nuclear Reactor Safety, Atlanta Georgia, 1977. New York, ASME, 1977. P.1 - 15.
- (5) COSTA, J.R. - Comportamento Termohidráulico do Canal Quente de um Reator PWR sob Condições de um Acidente de Perda de Refrigerante - Tese de Mestrado, Universidade do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, COPPE, 1978.
- (6) SHURE, K., Fission Producty Decay Energy. WAPD. BT 24, 1961, .
- (7) LAWSON, C.G.; Emergency Core Cooling Systems for Light Water Cooled Power Reactor. ORNL NSIC 24, UC 80, 1968.

- (8) BAKER, L.J.; IVINS, R.O., Analysing the Effects of Zirconium Water Reaction. Nucleonics 23 (7), pp (70 - 74), 1965.
- (9) AMBLARD, M.; SEMERIA, R.; Contact entre Bioxyde d' Uranium Fondu et Refrigerant (Sodium, Eau). CENG Rapport interne TT96, 1970.
- (10) DIETZ, K.A.; Loft Engineered Safety Systems Investigations. IDO 17258, A a K, 1969.
- (11) ANDREWS, D.G.; Aspect Energétique de la Sûreté des Reacteurs Nucléaires. CENG Note Interne TT 375, 1970.
- (12) CERMAK, J.O.; Westinghouse PWR ECC System. CREST Specialist Meeting on Emergency Core Cooling for Light Water Reactors. Garching/München, 1972.
- (13) Sistema de Refrigeração de Emergência do Núcleo. Usina de Angra - Unidade I - Manual de Operação - vol. II - Descrição dos Sistemas - Furnas Centrais Elétricas S.A., Nov. 1976.
- (14) YADIGAROGLU, G. et al. - Heat Transfer During the Reflooding Phase of the LOCA - State of Art - Report EPRI - 248 - I. Electric Power Research Institute, 1975.
- (15) FABER, G. E ROHDE, J. - Loss of Coolant Accident - Description of the General Course of the Accident and of the Counter - Measures With Respect to Emergency Core Cooling. Institut Für Reaktorsicherheit, Köln, 1975..
- (16) BRAISDELL, J.A.; HOCHREITER, L.E.; AND WARING J.P.; "PWR FLECHT - SET Phase A Report". WCAP - 8238 ,

December 1973.

- (17) THOMPSON, T.S.; "Simulated Bottom - Flooding Emergency Cooling of a Close - Spaced Rod Bundle". European Two - Phase Flow Group Meeting, Casaccia, June 6 - 8, 1972.

- (18) ANDRÉONI, D.; AND COURTAUD, M.; "Study of Heat Transfer During the Reflooding of a Single Rod Test Section". Proceedings of the CREST Specialist Meeting on Emergency Core Cooling for Light Water Reactors, Garching/München, October 18 - 20, 1972, MRR 115, vol. 1.

- (19) KIRCHNER, W.L.; "Reflood Heat Transfer in a Light - Water Reactor". Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, January 1976.

- (20) ANDRÉONI, D.; "Echanges Thermiques lors du Renoyage D'un Coeur de Réacteur à Eau". Thesis, L'Université Scientifique et Médicale de Grenoble et l'Institute National Polytechnique de Grenoble, November, 1975.

- (21) CADEK, F. F. ET AL.; "PWR - FLECHT (Full Length Emergency Cooling Heat Transfer) - Final Report". WCAP - 7665, April 1971.

- (22) WARING, J.P. AND HOCHREITER, L.E.; "PWR FLECHT - SET Phase B1 Evaluation Report". WCAP - 8483, August 1975.

- (23) WHITE, E.P.; AND DUFFEY, R. B., "A Study of the Unsteady Flow and Heat Transfer in the Reflooding of Water Reactor Cores". Central Electricity Generating Board. Report RD/B/N 3134, September 1974.

- (24) ELLION, M.E., "A Study of the Mechanism of Boiling Heat Transfer". Thesis, Jet Propulsion Laboratory, Memo 20 - 88, C.I.T., 1954.
- (25) MACDONOUGH, J.B.; MILICH, W.; AND KING, E.C., "An Experimental Study of Partial Film Boiling Region With Water at Elevated Pressure in a Round Vertical Tube", Chem. Eng. Prog. Symposium series 57, n° 32, 197 - 208, 1961.
- (26) SHIRES, G. L.; PICKERING, A. R.; AND BLACKER, P.T., "Film Cooling of Vertical Fuel Rods". AEEW - R - 343, 1964.
- (27) SEMERIA, R.; MARTINET, B., "Calefaction Spot on a Heating Wall: Temperature Distribution and Resorption". Proceeding Inst. Mech. Eng., 180 pt 3c, 192 - 205, 1965/66.
- (28) BENNETT, A.W.; HEWITT, G. F.; KEARSEY, H. A.; AND KEEYS, R. K. F., "The Wetting of Hot Surfaces by Water in a Steam Environment at High Pressure". AERE - R - 5146, 1966.
- (29) BRADFIELD, W.S., "On the Effect of Subcooling on Wall Superheat in Pool Boiling". J. Heat Transfer, 89: 269 - 270, 1967.
- (30) YAMANOUCI, A., "Effect of Core Spray Cooling in Transient State after Loss of Coolant Accident". J. Nucl. Sci. Technology 5 (11): 547 - 558, 1968.
- (31) SCHLENKER, L.D. ET AL., "Interim Report on SECHT Series I and II Tests and Analysis". IDO - 17278, August 1968.
- (32) WITTE, L. C.; BAKER Jr., L; HAWORTH, D. R. "The Ef-

fect of Subcooling on the Onset of Transition Boiling". Trans. Amer. Nucl. Soc. 12, 806, 1969.

- (33) WALFORD, F.J., "Transient Heat Transfer from a Hot Nickel Sphere Moving Through Water". Int. J. Heat Mass Transfer 12: 1621, 1969.
- (34) JACOBSON, R. N.; and SHAIR, F. H.; "Film Boiling from a Sphere During Forced Convection of Subcooled Water". I/EC Fundamentals 9 (1), 183 - 185, 1970.
- (35) BERGLES, A.E.; THOMPSON JR., W.G., "The Relationship of Quench Data to Steady State Pool Boiling Data". Int. J. Heat Mass Transfer 13, 55 - 68, 1970.
- (36) STEVENS, J. W.; WITTE, L.C.; COX, J. E.; AND BULLOCK, R.L., "Transition Boiling from Spheres to Water". ORO - 3936-3, April 1970.
- (37) DUNCAN, J. D.; AND LEONARD, J.E.; "BWR Standby Cooling Heat Transfer Performances under Simulated Loss of Coolant Conditions Between 15 and 300 Psia". USAEC Report, GEAP 13190, 1971.
- (38) MOSER, C. M.; AND GRIEBE, R. W., "SECHT III - An Experimental Investigation of Top and Bottom Flooding of a Nuclear Bundle Simulator. IN - 1355, February 1970.
- (39) PLUM, J. L., "SECHT IV Performance Evaluation of Stainless Steel and Zircaloy - Clad Electrically Powered Heaters". IN - 1378, June 1970.
- (40) JENSEN, R.T., "Experimental Results of The Fuel Heatup Simulation Tests (FHUST) - Emergency Core Cooling Test Series". IN - 1390, September 1970.

- (41) YOSHIOKA, K.; AND HASEGAWA, S., "A Correlation in Displacement Velocity of Liquid Boundary Formed on a Heated Vertical Surface in Emergency Cooling". J. Nucl. Sci. Technol. 7, 418, 1970.
- (42) ELLIOT, D. F.; AND ROSE, P.W., "The Quenching of Heated Surface by Film of Water in a Steam Environment at Pressure up to 53 bars". AEEW-M 976, 1970; "The Quenching of Heating Zircaloy Surface by film of Water in a Steam Environment at Pressure up to 53 bars". AEEW-M 1027, 1971.
- (43) ROGERS, A.E.; AND LEONARD, J.E., "An Analytical Model of the Transient Reactor Core Spray Cooling Process". Chem. Eng. Progress. Symp. Series 119, vol. 67, 1971.
- (44) CADEK, F.F.; DOMINICS, D. P.; AND LEYSE, R. H., "PWR FLECHT - SET - Final Report". WCAP 7665, April 1971. "PWR FLECHT - SET - Final Report Supplement". WCAP 7931, October 1972.
- (45) STEVENS, J.W.; AND WITTE, L.C., "Transient Film Transition Boiling Data from a Sphere". Inst. J. Heat Mass Transfer, 14, 443 - 450, 1971.
- (46) OWENS JR., F.L.; FLORSCHUETZ, L.W.; "Transient vs Steady - State Nucleate Boiling". J. of Heat Transfer 94, pp 331 - 333 August 1972.
- (47) STEVENS, J. W.; AND WITTE, L. C., "Film and Transition Boiling Around Spheres". Trans. ANS 15, 816, 1972.
- (48) THOMPSON, T. S.; "An Analysis of the Wet-Side Heat Transfer Coefficient During Rewetting of a Hot Dry Patch". Nucl. Eng. Design 22, 212 - 224, 1972.

- (49) BLANCK, P.; RIEDLE, K., SEIDELBERGER, T. AND ULRICH, G.; "Flooding Experiments in a Single Tube and in a 340 Rod Bundle Test Section". European Two - Phase Flow Meeting, Rome, 1972.
- (50) DUFFEY, R.B.; AND PORTHOUSE, D.T.C., "Experiments on the Cooling of High Temperature Surface by Water Jets and Drops". CREST Meeting, paper A II 2, Munich, 1972;
"The Physics on the Rewetting in a Water Reactor Emergency Core Cooling". Nucl. Eng. Des. 25, 379-394, 1973.
- (51) CAMPANILE, A.; AND POZZI, G.; "Low Rate Emergency Reflooding Heat Transfer Test in a Rod Bundle". CREST Meeting, paper A II 3, MRR 15, vol. 1, München, October 18 - 20, 1972.
- (52) RIEDLE, K.; AND WINKLER, F.; "ECC Reflooding Experiments with 340 Rod Bundle". CREST Meeting, paper A II 4, Munich, 1972.
- (53) MARTINI, R.; AND PREMOLI, A.; "Bottom Flooding Experiments with Simple Geometry under Different ECC Conditions". CREST Meeting on Emergency Core Cooling for Light Water Reactors, paper A II - 5, Munich, October 18 - 20, 1972.
- (54) OGASAWARA, H.; KASHIWAI, S.; AND TAKASHIMA, Y.; "Cooling Mechanism of the Low Pressure Coolant Injection System of Boiling Water Reactors and Other Studies on the LOCA Phenomena". Topical Meeting on Water Reactor Safety, Salt Lake City, Utah, March 26 - 28, 1973, CONF 730334, pp 351 - 370.
- (55) BURCK, E.; HUFSCHEMIDT, W.; AND DECLERCQ, E.; "Instationäre Wärmeübertragung beim Sieden von Wasser

an der Senkrechten Wand eines Reaktordruckbehäl -
ters". Atomkernen 21, 127 - 135, 1973.

- (56) CUMO, M. FARELLO, G.E.; AND PALAZZI, G.; "Preliminary Remarks on Emergency Cooling for L.W.R.". European Two - Phase Flow Meeting, Brussel, 1973.
- (57) COLOMBO, A.; MARTINI, R.; MEDICH, C.; AND PREMOLI, A.; "An Experimental Study on Heat Transfer in Bottom Flooding ECC Conditions". European Two - Phase Flow Meeting, Brussel, 1973.
- (58) YU, S. K. W.; The Rewetting of Hot Surfaces by a Falling Film: the Effects of Pressure, Subcooling and Flow Rate.
- (59) PIGGOTT, B. D. G.; AND PORTHOUSE D. T. C.; "Water Reactors ECC The Effects of Pressure, Subcooling and Surface Condition on the Rewetting of Hot Surface". Central Electricity Generating Board RD/B/N 2692, 1973.
- (60) PETERSON, W. C.; ABOUL FETOUH, M. M.; AND ZAALOUK, M. G.; "Boiling Curve Measurements from a Controlled Forced Convection Process". Proc. British Nucl. Eng. Society Conference on Boiler Dynamics and Control in Nuclear Stations, London, 1973.
- (61) PLUMMER, D. N.; "Post Critical Heat Transfer to Flowing Liquid in a Vertical Tube". Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 1974.
- (62) SCHNEIDER, & THOMAS; Further Development of the Technology of Light Water - Cooled Reactors - Project 26-Cooling Conditions of the Reactor Core in the Case of the Maximun Credible Accident During Refilling by the Safety Feed System - Final Report".

AEC - tr - 7396, February 1973.

- (63) CASE, P.; HEIN, D.; RIEDLE, K.; AND SCHNEIDER, E. ;
"The Rewetting Process of Hot Surfaces by Bottom
Flooding". European Two - Phase Flow Meeting, Brus-
sel 1973.
- (64) HEIN, D.; RIEDLE, K.; AND SCHNEIDER, E.; "Das Forts-
chreiten Einer Wiederbenetzungsfront Beim Fluten".
Deusches Atomforum, Reaktortagung, Berlin, 1974.
- (65) RAMU, K.; AND WEISMAN, J.; "A Method for the Correla-
tion of Transition Boiling Heat Transfer Data".
5th Inst. Heat Transfer Conference, Tokyo, 1974.
- (66) ANDRÉONI, D.; COURTAUD, M. AND DERUAZ, R.; "Heat Trans-
fer During the Reflooding of a Tubular Test Sec-
tion". European Two - Phase Flow Meeting, Harwell,
June 3-7, 1974.
- (67) WARING, J. P., ET AL.; "PWR FLECHT - SET Phase B1 Da-
ta Report". SCAP-8431, December 1974.
WARING, J. P.; and HOCHREITER, L. E.; "PWR FLECHT-
SET Phase B1 Evaluation Report". WCAP-8483, August,
1975.
- (68) PIGGOTT, B. D. G.; AND DUFFEY, R. B.; "The Quenching
of Irradiated Fuel Pins". Nucl. Eng. Design 32,
182 - 190, 1975.
- (69) YU, S.K.W.; "The Rewetting of Hot Surfaces by a Fal-
ling Water Film: the Effects of Pressure, Subcoo-
ling and Flow Rate". C.E.R.L. Internal Note, 1975.
- (70) HEIN, D.; "Heat Transfer With Subcooling Film Boi-
ling". European Two - Phase Flow Meeting, Haifa ,
1975.

- (71) ERICSON, L.; "Series of Containment Response Experiments in the Marviken Power Plant". Trans. Am. Nucl. Soc., v. 20 p 508-510, April, 1975.
- (72) FARMER, R. R.; "The Rewetting of Hot Surfaces by Bottom Flooding - The Effects of Water Flowrate and Temperature". European Two - Phase Flow Meeting, Haifa, 1975.
- (73) JANSEN, E.; AND KERVINEN, J.; "Film Boiling and Rewetting ". NEDO 20975, August, 1975.
- (74) LAUER, H.; "Untersuchung des Wärmeübergangs und der Wiederbenetzung beim Abkühlen heißer Metallkörper". Diss. T.U. Hannover, 1976.
- (75) THOMAS, C. R.; "The Effect of High Pressure and Surface Deposits on Rewetting Rates". European Two - Phase Flow Meeting, Grenoble, 1977.
- (76) RALPH, J.C.; SANDERSON, S.; AND WARD, J.A.; "Experimental Studies of Post-Dryout Heat Transfer to Low Quality Steam-Water Mixtures at Low Pressures". European Two - Phase Flow Group Meeting, Grenoble, 6-9, June, 1977.
- (77) LEE, Y.; CHEN, W. Y.; AND GROENEVELD, D. C.; "Rewetting of Very Hot Vertical and Horizontal Channels by Flooding". Paper presented at the 6th International Heat Transfer Conference, Ottawa, Ontario, Canada, 1978.
- (78) DJA, S. S.; AND TIEN, C.L.; "Two-Dimensional Analysis on Conduction - Controlled Rewetting With Precursory Cooling". Journal of Heat Transfer Trans. ASME, séries C, vol. 98, p. 407-413, 1976.

- (79) BLAIR, J. M.; "An Analytical Solution To a Two - Dimensional Model of the Rewetting of a Hot Dry Rod". Nucl. Eng. & Design, vol. 32, p. 159-170, 1975.
- (80) HOCHREITER, L. E.; AND RIEDLE, K.; "Reflood Heat Transfer and Hydraulics in PWR", In: Jones, O. C. Jr.; Bankoff S. G. (eds) Thermal and Hydraulic Aspects of Nuclear Reactor Safety ASME, New York , vol. I, 1977.
- (81) SAWAN, M. E.; AND CARBON, M. W.; "A Review of Spray Cooling and Bottom - Flooding Work for LWR Cores". Nuclear Eng. and Design, vol. 32, p. 191-207, 1975.

