

AVALIAÇÃO DAS MEDIDAS DE PERDA DE PRESSÃO  
TOTAL DURANTE A FASE DE REMOLHAMENTO

Roberto Longo Freitas

Departamento de Tecnologia de Reatores  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear  
São Paulo - SP

SUMÁRIO

Este trabalho objetiva fazer uma comparação teórica-experimental dos resultados de perda de pressão total durante a fase de remolhamento de um Acidente de Perda de Refrigerante Primário.

Verificou-se desta avaliação que os modelos de fração de vazio e de perda de pressão em escoamento bifásico, incluindo a influência da ebulição sub-resfriada e da configuração do escoamento, não permitem prever com uma precisão satisfatória os resultados experimentais obtidos. Esta diferença se deve ao fato de que os modelos disponíveis são estabelecidos, na sua grande maioria, para condições diferentes daquelas do remolhamento.

ABSTRACT

These work draw a theoretical-experimental comparison from the total pressure drop results during the reflood phase of a loss of coolant accident of a PWR. It was verify from this avaluation that the void fraction and the pressure drop models for the two-phase flow, including the subcooled boiling influence and the flow configuration, don't permit a satisfactory prediction of the experimental datas.

These differences can occur from the fact that the existing models are establish, in your great number, for different conditions that the one's for reflood.

## 1. OBJETIVO

O conjunto dos trabalhos experimentais que foram realizados até o presente momento no domínio de fase de remolhamento tem mostrado que os parâmetros que influenciam a refrigeração do núcleo, para uma dada potência residual são: a pressão média no núcleo do reator, a temperatura inicial dos elementos combustíveis, a temperatura da água de resfriamento na entrada do núcleo e a vazão mássica da água chegando efetivamente nos elementos combustíveis. Assim, de uma maneira particular, este trabalho objetiva avaliar as medidas de perda de pressão total durante a fase de remolhamento através dos resultados obtidos na experiência ERSEC comparando-as com os modelos teóricos de fração de vazio e de perda de pressão em escoamento bifásico, incluindo a influência da ebulição sub-resfriada e da configuração de escoamento.

## 2. CIRCUITO EXPERIMENTAL ERSEC

O circuito experimental ERSEC (Étude de Refridissement de Secours des Elements Combustibles) [1] permite estudar a eficiência dos sistemas de refrigeração de segurança em diferentes tipos de seção de testes durante a fase de remolhamento, conforme mostrado na figura 1.

A tabela 1 apresenta as condições operacionais da experiência ERSEC cujos parâmetros essenciais são mantidos constantes ao longo de cada transiente. As principais medidas efetuadas são: vazão mássica de água de injeção de resfriamento, fluxo de calor térmico, temperatura da água na entrada da seção de testes, temperatura da parede dos elementos aquecidos e perda de pressão ao longo do canal.

Tabela 1 - Faixa operacional da experiência ERSEC

velocidade mássica da água	$G = 2 - 5 - 8 - 12 \text{ g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
fluxo de calor	$\phi = 3 - 5 - 7 \text{ W.cm}^{-2}$
sub-saturação da água	$\Delta T_{\text{sub}} = T_{\text{sat}} - T_{\text{ent}} = 20 - 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$
pressão	$p = 1 - 3 - 6 \text{ bar}$
temperatura inicial da parede	$T_p = 300 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$

As medidas de perda de pressão foram efetuadas em regime permanente assim que a fase de remolhamento é terminada. A seção de teste é constituída de um tubo em inonel, de diâmetros 12 x 14 mm, aquecida por efeito Joule e cuja distribuição axial de potência é uniforme. Tendo em vista que o modo de aquecimento não permite medir a evolução axial de pressão em condições satisfatórias, a medida da perda de pressão do escoamento foi efetuada entre a entrada e a saída da seção de testes para diferentes comprimentos aquecidos, conforme mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Condições operacionais para as medidas de perda de pressão na experiência ERSEC.

Pressão (bar) ; 1 - 3 - 6  
                   x   o   Δ

Comprimento aquecido (mm)				Parâmetros		
1017	2130	2730	3325	G (g cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	φ (W cm <sup>-2</sup> )	ΔT <sub>sub</sub> (°C)
x Δ	x Δ	x Δ	x Δ	2	3	80
xoΔ	oΔ	xoΔ	xoΔ	2	3	20
x	x	x	x	5	3	80
x	x	x	x	5	3	20
x	x	x	x	8	3	80
x	x	x	x	8	3	20
x	x			12	3	80
xoΔ	xoΔ	xoΔ	xoΔ	12	3	20
xoΔ	xoΔ	xoΔ		2	5	80
xoΔ	xoΔ	xoΔ	xoΔ	5	5	80
xoΔ	xoΔ	xoΔ	xoΔ	5	5	20
x	xoΔ	xoΔ	xoΔ	8	5	80
xoΔ	xoΔ	xoΔ	xoΔ	8	5	20
x	xoΔ	xoΔ	xoΔ	12	5	80
xoΔ	xoΔ	xoΔ	xoΔ	12	5	20
x	x	x	x	5	7	80
x	x	x	x	5	7	20
xoΔ	xoΔ	xoΔ	xoΔ	8	7	80
xo	x	xo	xo	8	7	20
xo	xo	xo	xo	12	7	80
xo	x	xo	xo	12	7	20

### 3. COMPARAÇÃO TEÓRICA-EXPERIMENTAL

Para avaliar os resultados de perda de pressão total obtidos na experiência ERSEC, os seguintes modelos foram utilizados após uma escolha judiciosa de acordo com a referência [2]:

- 1 - Ponto de geração franca de vapor: O modelo de Saha e Zuber [3] foi escolhido devido a levar em conta um grande número de resultados experimentais, particularmente para os valores do número de Peclet próximos as condições de interesse (fracos fluxo de calor, pressão e vazão mássica).
- 2 - Fração de vazio: A fração de vazio foi calculada com o modelo de Zuber, Staub e Bijwaard [4] (Modelo "Drift Flux"). Os valores do parâmetro de distribuição  $C_0$  e de velocidade de deriva ponderada do vapor  $V_{gj}$  utilizados no modelo estão apresentados na tabela 3 para os diferentes regimes de escoamento. É importante ressaltar que  $C_0$  e  $V_{gj}$  foram mantidos constantes (mesmo regime de escoamento) desde a aparição do ponto de geração franca de vapor até a saída da seção de testes. Cálculos foram igualmente efetuados com o parâmetro de distribuição proposto por Dix [5]. A fração de vazio também foi calculada com o modelo de Yamazaki e Yamaguchi [6].

Tabela 3 - Valores de  $C_0$  e  $V_{gj}$  utilizados na comparação cálculo - experiência.

Regime de Escoamento	Turbulento	Pistonado	Anular	Homogêneo
$C_0$	1,13	1,2	1,0	1,0
$V_{gj}$	$1,18 \left[ \frac{g \sigma \Delta \rho}{\rho_l^2} \right]^{1/4}$	$0,56 \left[ \frac{g \Delta \rho D_h}{\rho_l} \right]^{1/2}$	$23 \left[ \frac{\mu_l v_{ent}}{\rho_g D_h} \right]^{1/2} \frac{\Delta \rho}{\rho_l}$	0,0

- 3 - Configuração do escoamento: O modelo analítico de Dukler e Taitel [7] foi utilizado para a transição do regime pistonado-anular.
- 4 - Perda de pressão total: O cálculo de perda de pressão total foi efetuado com os modelos homogêneo e a fase separada [2].

### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As figuras 2.1 a 2.3 comparam as perdas de pressão calculadas com os resultados experimentais mostrando que:

- (i) os valores calculados com o modelo homogêneo, figuras 2.1-a, 2.1-b e 2.1-c, que superestima a fração de vazio, são, como era de se esperar, largamente inferiores aos valores experimentais, isto é, 30

a 70 % quando a pressão varia de 1 a 6 bar.

(ii) O modelo de Yamazaki e Yamaguchi subestimam a perda de pressão quando associado ao multiplicador de atrito do regime pistonado, figuras 2.1-d, 2.2-a e 2.2-b, a saber, 70 a 30 % quando a pressão varia de 1 a 6 bar. A utilização do multiplicador de atrito anular melhora um pouco os resultados, isto é, variando de + 30 a - 20 % a pressão atmosférica e subestimando os resultados por volta de 40 % para pressões de 3 a 6 bar, conforme mostrado nas figuras 2.2-c, 2.2-d e 2.3-a.

(iii) O modelo "Drift Flux", figuras 2.3-b a 2.3-d, fornece resultados sensivelmente melhores, porém a diferença entre o cálculo e os resultados experimentais chegam ainda a atingir valores elevados, conforme mostrada na tabela 4. Assim, relativamente aos resultados analisados com este modelo pode-se resumir que:

- os modelos "Drift Flux" turbulento e pistonado subestimam sistematicamente a perda de pressão,
- o modelo anular considera particularmente mal o efeito de pressão,
- que a modificação do parâmetro de distribuição proposto por Dix não melhora sensivelmente os resultados, exceto para o regime anular quando a pressão é diferente de 1 bar.

Tabela 4 - Desvio máximo obtido com o modelo "Drift Flux"

\* mesma ordem de grandeza para 3 bar.

Regime p (bar)	Turbulento	Pistonado	Anular	Pistonado Dix	Anular Dix
1	- 35%	- 25%	- 50%	- 50%	+ 35%
6	- 20%	- 15%	- 20%	- 20%	+ 6% - 10% *

(iv) Finalmente, os cálculos efetuados utilizando-se das cartas de regime de escoamento de Dukler e Taitel não trouxeram nenhum melhoramento decisivo aos resultados.

## 5. CONCLUSÕES

Uma avaliação entre o cálculo e a experiência foi realizada a partir das medidas globais de perda de pressão total efetuada na experiência ERSEC em um tubo de diâmetro hidráulico próximo do diâmetro hidráulico de um elemento combustível de reatores a água leve pressurizada.

A comparação das perdas de pressão calculadas relativamente aos resultados experimentais mostram que os modelos simplificados examinados não permitem fazer previsões com uma precisão satisfatória. Isto advém do fato de que os modelos de fração de vazio, ebulição sub-resfriada e perda de pressão total dispo-

níveis são estabelecidos, na sua grande maioria, para as condições próximas das condições nominais de funcionamento dos reatores nucleares. Assim, um esforço maior deve ser feito, do ponto de vista da modelagem, visando melhorar os conhecimentos para as baixas pressões, fracos fluxos de calor e velocidade mássicas que constituem as condições reais do remolhamento.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDREONI, D.; "Echanges thermiques lors de renoyage d'un coeur de reacteur à eau dans le cadre de l'accident de reference". Thèse de Docteur Ingénieur, Université Scientifique et Médicale de Grenoble/Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 1975, France.
- [2] FREITAS, R.L.; "Hydrodynamique des écoulements eau-vapeur dans la zone remouillée d'un tube chauffante en renoyage. Thèse de Docteur Ingénieur, Université Scientifique et Médicale de Grenoble/Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 1981, France.
- [3] SAHA, P. & ZUBER, N.; "Point of net vapor generation and vapor void fraction in subcooled boiling". Heat Transfer 1974, Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf., Tokyo, 4, paper B4.7, 175-179, 1974.
- [4] ZUBER, N.; STAUB, F.W. & BIJWAARD, G.; "Vapor void fraction in subcooled boiling and in saturated boiling systems". Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf., Chicago, 5, paper nº 154, 24-38, 1966.
- [5] DIX, G.E.; "Vapor void fractions for forced convection with subcooled boiling at low flow rates". Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 1971, USA.
- [6] YAMAZAKI, Y. & YAMAGUCHI, K.; "Void fraction correlation for boiling and non-boiling vertical two-phase flows in tube". J. of Nuclear Science and Technology, 15, 701-707, 1976.
- [7] DUKLER, A.E. & TAITEL, Y.; "Flow regime transitions for vertical upward gas liquid flow. A preliminary approach through physical modeling". NUREG - 0162/NRC-2, 4, 1977.

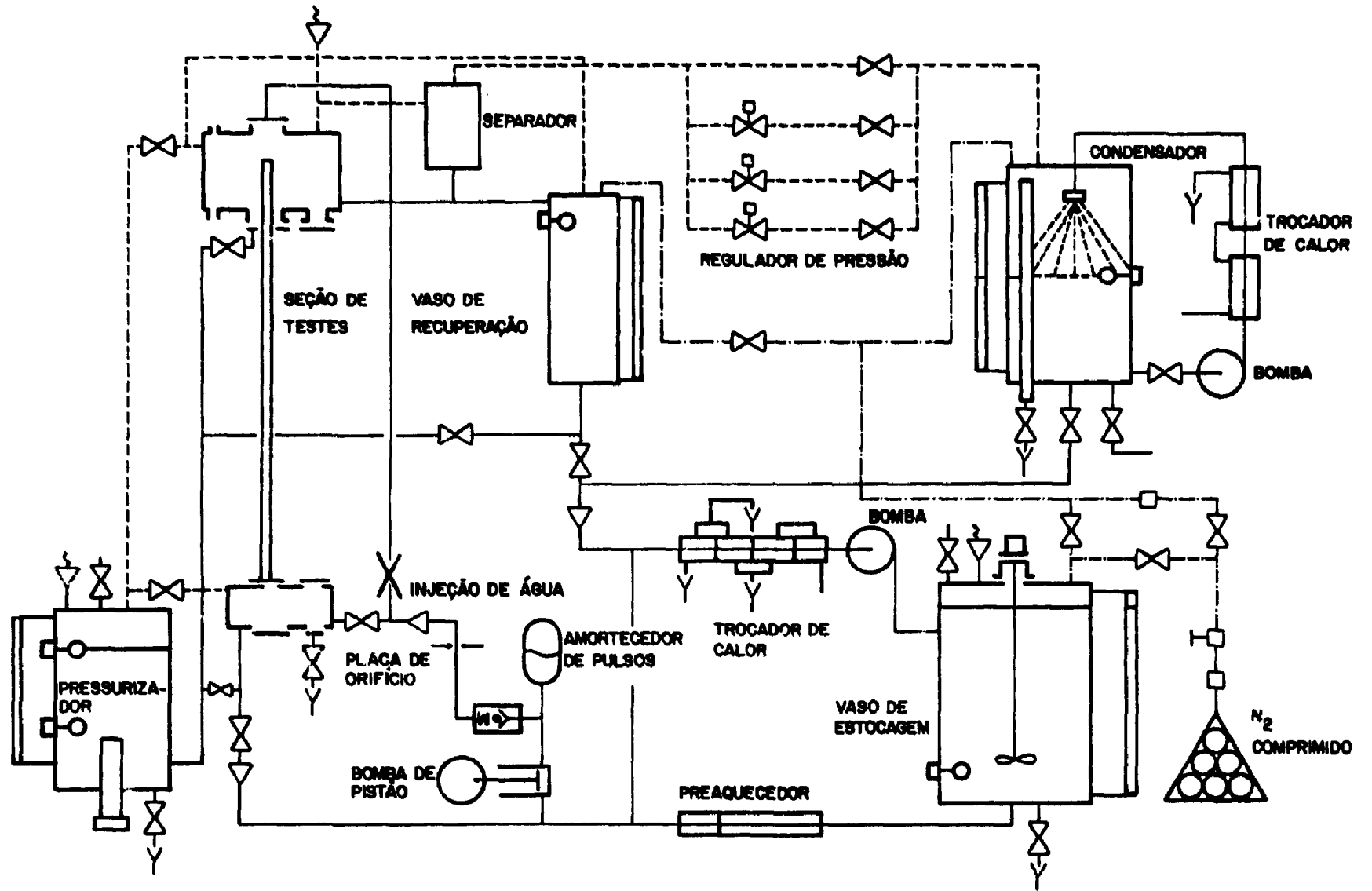


FIGURA 1: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA EXPERIÊNCIA ERSEC.

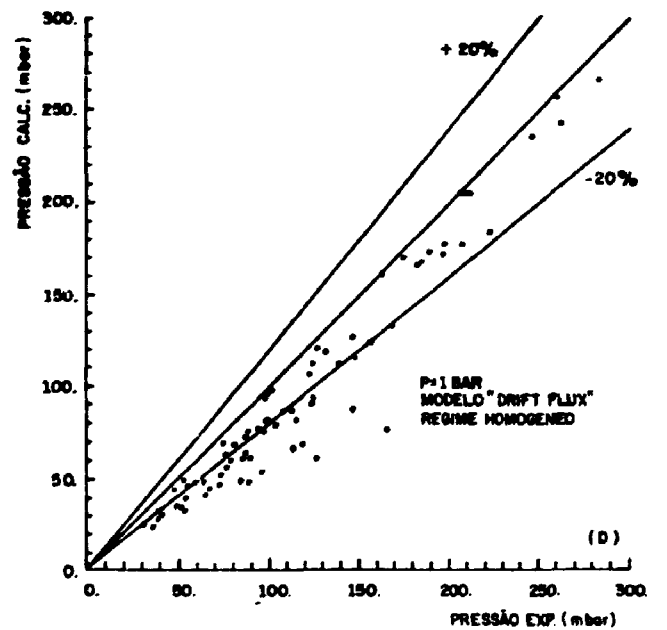
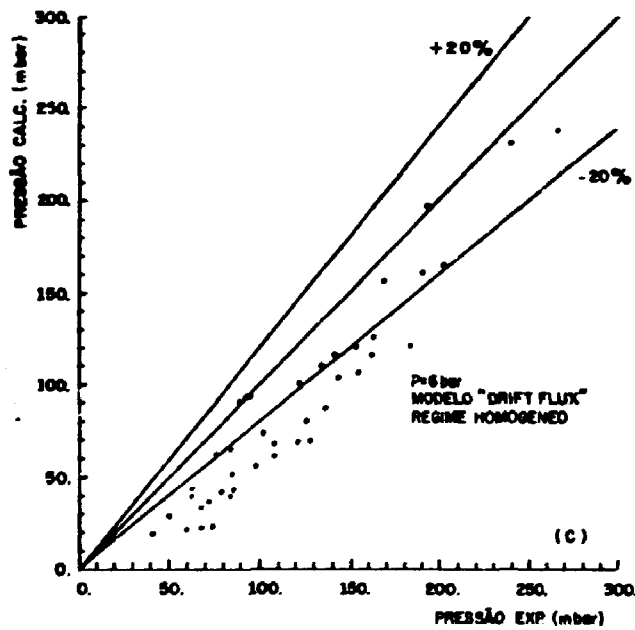
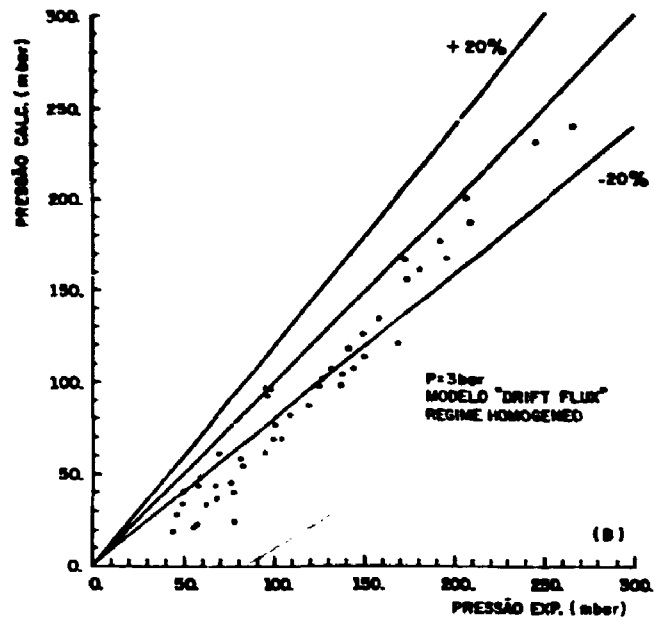
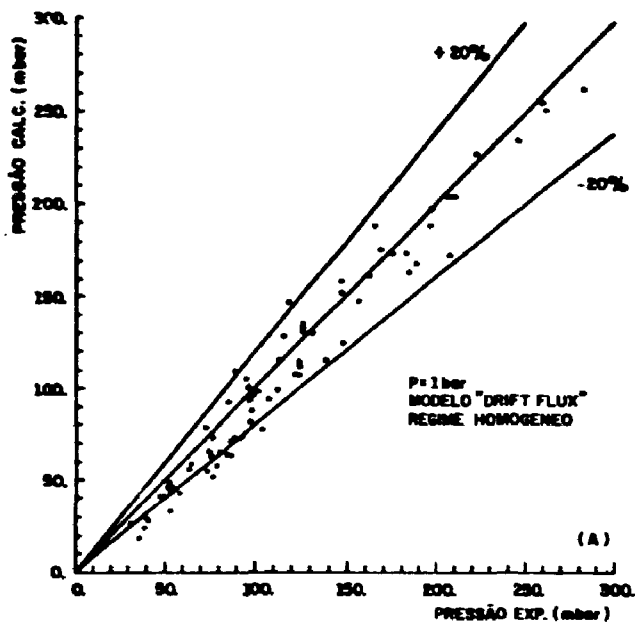
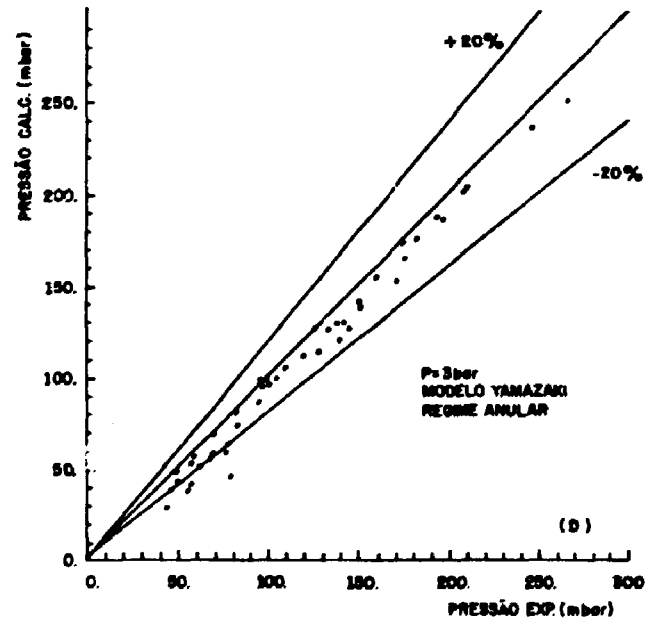
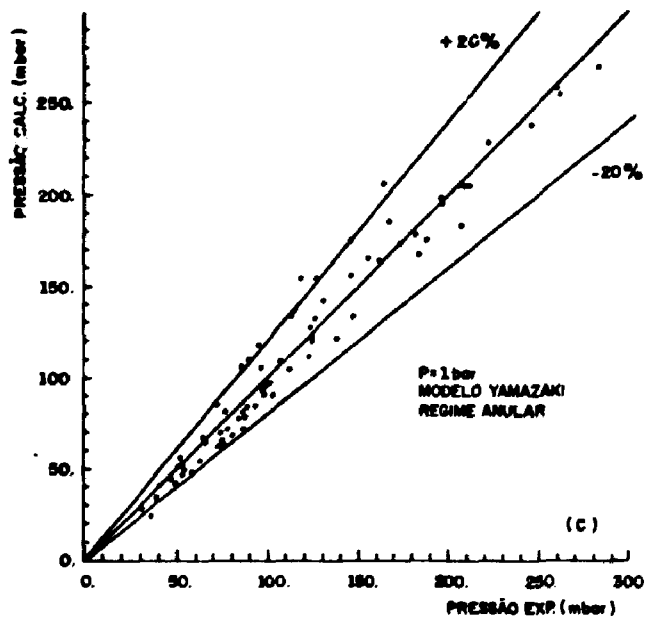
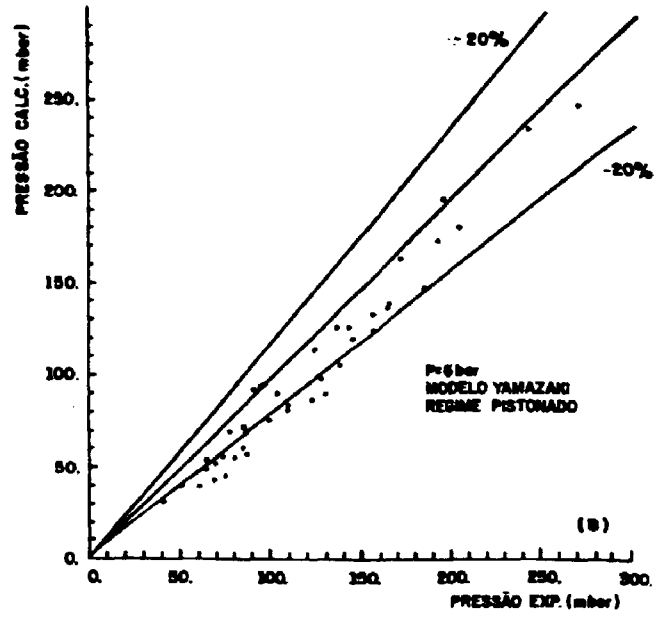
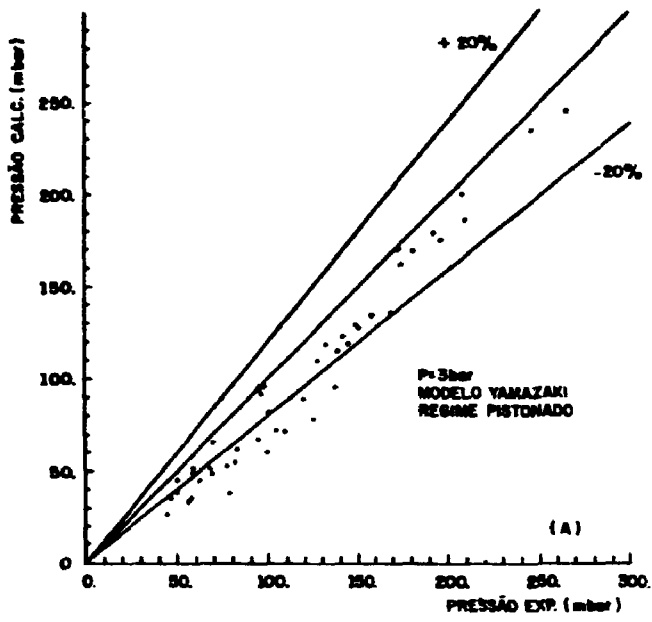


FIGURA 2.1: COMPARAÇÃO ENTRE A PERDA DE PRESSÃO TOTAL CALCULADA E EXPERIMENTAL.



**FIGURA 2.2: COMPARAÇÃO ENTRE A PERDA DE PRESSÃO TOTAL CALCULADA E EXPERIMENTAL.**

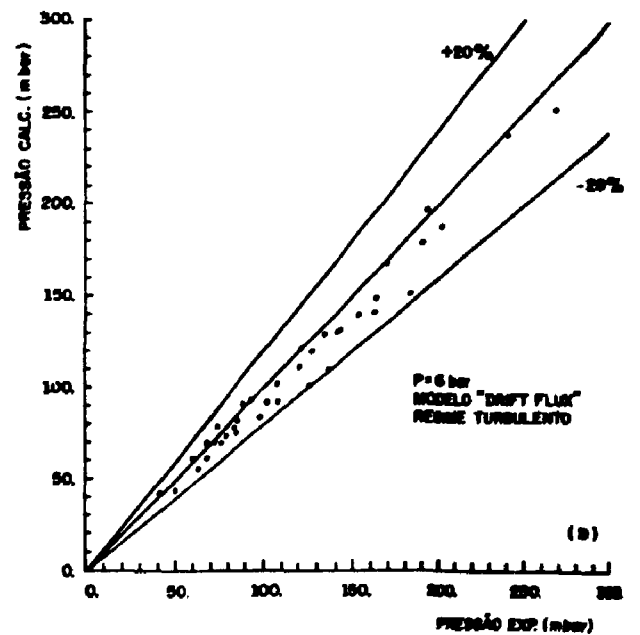
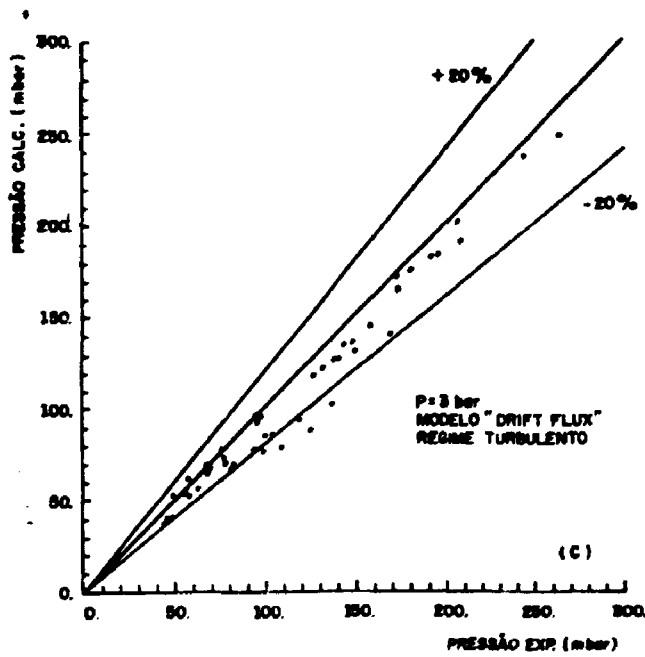
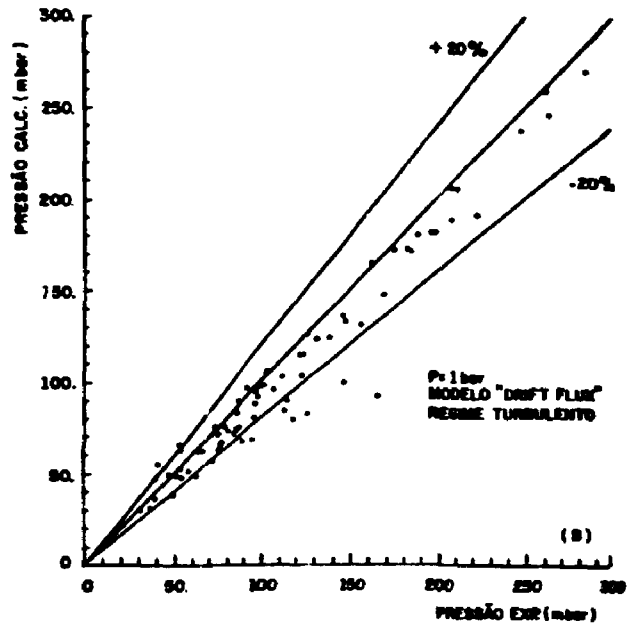
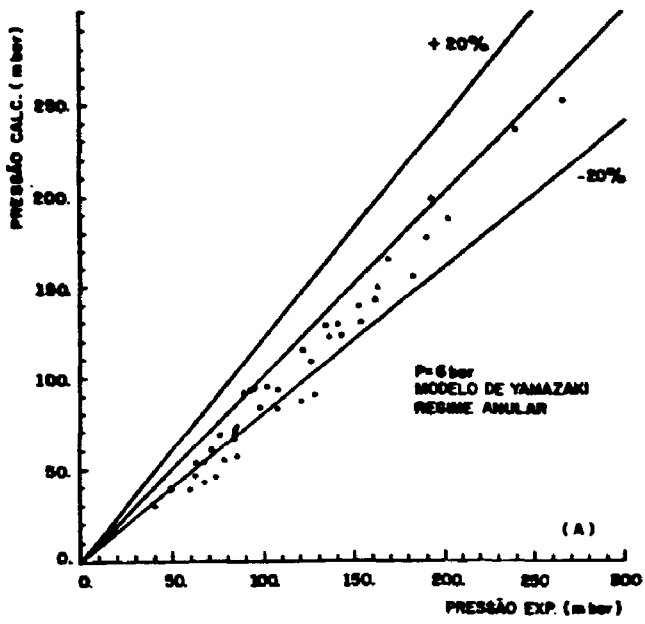


FIGURA 2.3: COMPARAÇÃO ENTRE A PERDA DE PRESSÃO TOTAL CALCULADA E EXPERIMENTAL.