

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FENÔMENO DE REMOLHAMENTO
DE UM ELEMENTO DE COMBUSTÍVEL

FRANCISCO ANTONIO BRAZ FILHO

ARTUR JOSÉ GONÇALVES FAYA

DIVISÃO DE TERMODINÂMICA E TERMO-HIDRÁULICA
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO, SP

SUMÁRIO

Este trabalho tem como objetivo o estudo do fenômeno de remolhamento de uma barra de combustível após um acidente de perda de refrigerante (LOCA).

A análise do remolhamento é feita pela resolução da equação de condução de calor bidimensional em geometria cilíndrica.

Um sistema de equações do tipo $A \cdot \underline{T} = \underline{S}$, é resolvido por uma variação do método de Gauss. Além do vetor \underline{T} de temperaturas, há mais duas incógnitas: o comprimento e a velocidade da frente de remolhamento, calculadas através de um método iterativo.

Uma das maiores dificuldades no estudo deste fenômeno reside na estimativa do coeficiente de transferência de calor (h). Por esta razão, dois modelos foram elaborados: no primeiro h possui um valor uniforme para cada uma das três regiões de transferência de calor consideradas; no segundo o perfil de h é simulado pela curva de ebulição. Em ambos os resultados apresentaram-se satisfatórios após terem sido comparados com resultados experimentais e teóricos de outros investigadores.

1. Introdução

O acidente de perda de refrigerante em um reator refrigerado por água leve caracteriza-se por uma rápida despressurização do circuito primário. Em poucos segundos o núcleo está imerso em vapor e a temperatura do encamisamento sobe rapidamente em virtude da energia liberada pelo decaimento dos produtos de fissão. Nesta situação o sistema de segurança deve injetar água no núcleo para reestabelecer a refrigeração e garantir que as temperaturas das varetas e a oxidação do encamisamento mantenham-se em níveis não danosos a integridade física e geométrica do elemento de combustível. Em consequência das altas temperaturas atingidas pelo encamisamento, a água proveniente do sistema de refrigeração de emergência, inicialmente, não molha a superfície quente. O remolhamento da superfície aquecida ocorre quando o refrigerante reestabelecer contato com a parede seca, a uma temperatura conhecida como temperatura de remolhamento.

Quando uma superfície aquecida - na qual a temperatura está acima da temperatura de remolhamento - é subitamente imersa num refrigerante, rapidamente forma-se um filme de vapor estável entre a parede e o líquido. A transferência de calor por convecção e radiação removem calor da parede, decrescendo sua temperatura e, depois de algum tempo, o filme torna-se instável. Começam a aparecer locais intermitentemente molhados na superfície, desenvolvendo-se um regime de ebulição de transição, que seguido de um aumento da refrigeração, possibilita a formação de um caminho molhado. Este caminho propaga-se e resulta na formação de uma frente de remolhamento⁽¹⁾. Observações visuais tem revelado, que esta frente progride ao longo da frente em variações lentas da velocidade⁽⁶⁾.

Os modelos encontrados na literatura⁽³⁾ podem ser: numéricos ou analíticos; unidimensionais ou bidimensionais; divididos em duas regiões de transferência de calor, três regiões, ou ainda, em várias regiões. A cada tipo de modelo apresentado, acham-se diversos perfis do coeficiente de transferência de calor e modelos da temperatura de remolhamento, como se pôde ver nas figuras 1 e 3⁽⁹⁾.

Este trabalho dedicou-se ao estudo do fenômeno de remolhamento. Um programa computacional foi construído para calcular: o perfil de temperaturas no encamisamento, juntamente ao comprimento e

ã velocidade de remolhamento. No modelo considerado, foram elaborados dois perfis diferentes para o coeficiente de transferência de calor (h):

- . um modelo de três regiões de transferência de calor, com h constante em cada uma delas,
- . e outro, o h foi modelado pela curva de ebulição

2. Fundamentos Teóricos

Considera-se uma barra de combustível imersa em vapor (ou ar) em todo seu comprimento. Deseja-se saber a evolução temporal da temperatura no encamisamento. Para tanto deve-se resolver a equação de condição de calor em geometria cilíndrica bidimensional (r-z):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q'''(r, z, t) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{com} \quad T = T(r, z, t) \quad (1)$$

A fim de simplificar a resolução usou-se as seguintes hipóteses:

- (a) A velocidade de remolhamento (v) é considerada constante. Com isso pode-se definir uma variável y tal que $y = z - vt$.
- (b) As propriedades do encamisamento como: calor específico (c_p), condutividade térmica (k), e a densidade (ρ) são consideradas constantes.
- (c) O escoamento é vertical ascendente do tipo inundação (bottom flooding).
- (d) A geração de calor residual é desprezível no encamisamento ($q''' = 0$).
- (e) O estudo foi feito sobre um comprimento (L_T) da barra de combustível, onde, supõe-se que as temperaturas de contorno especificadas tenham alcançadas.
- (f) O perfil de temperaturas é dado (vide a seguir), uma vez que não se resolvem as equações de conservação do fluido.
- (g) No cálculo da temperatura de remolhamento utilizou-se a correlação de Henry⁽⁷⁾.
- (h) A temperatura de início de ebulição nucleada (T_{ien}) foi

Considerada igual à temperatura de saturação (T_{sat})

Com estas hipóteses a equação de condução de calor torna-se :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T(r,y)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,y)}{\partial y^2} + q'''(r,z,t) = \frac{\rho c_p v}{k} \frac{\partial T(r,y)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Os trabalhos sobre remolhamento, como mostrado nas figuras 2 e 3, usam perfis do coeficiente de transferência de calor muito simplificados. Neste estudo procurou-se um melhor desenvolvimento nesse aspecto, e por isso foram elaborados dois modelos:

(A) Modelo de Três Zonas:

Neste modelo dividiu-se a região estudada em três zonas de transferência de calor: uma região de líquido saturado com alto coeficiente de transferência de calor (h_{fr}), denominada frente de remolhamento, compreendida entre o ponto de remolhamento e o início de ebulição nucleada (de comprimento L_{fr}); uma região à jusante da frente de remolhamento com pobre transferência de calor (h_v); e uma montante da frente, considerada uma região subresfriada (h_ℓ). O coeficiente é suposto constante em cada uma das três zonas. O perfil de temperaturas do refrigerante é considerado constante e igual à temperatura de saturação na região de frente de remolhamento, varia linearmente entre T_e (temperatura de entrada) e T_{sat} (temperatura de saturação) na região de sub-resfriamento e varia linearmente entre T_{sat} e T_v (temperatura de saída) na região superaquecida. Este modelo é ilustrado na figura 3.

(B) Modelo da Curva de Ebulição

A variação do fluxo de calor ao longo da frente de remolhamento, calculado por simples métodos aproximados indicam que a relação entre a temperatura da parede e o fluxo de calor assemelha-se às características da clássica ebulição em piscina (pool boiling) ⁽¹⁾. Isso não é estranho, já que encontram-se regimes de transferência de calor similares em ambos. A descontinuidade da distribuição de h , que é necessária para criar um gradiente brusco no perfil de temperaturas axial na superfície do revestimento, é fornecida pela rápida

variação do h no regime de ebulição de transição (transition boiling). Uma tentativa foi feita para descrever a variação de h na frente de remolhamento usando as correlações convencionais de ebulição em piscina (pool boiling) e escoamento em ebulição forçada (flow boiling). Adotou-se o procedimento recomendado por Kirchner e Griffith⁽⁸⁾. Utilizou-se um perfil de temperaturas do refrigerante idêntico ao do modelo de três zonas. Para o caso de inundação ascendente (bottom flooding), encontram-se os seguintes regimes (figura 4):

- para $T_w > T_{fr}$ - regime de ebulição por filme
- para $T_{fr} \geq T_w > T_{fcc}$ - regime de ebulição de transição
- para $T_{fcc} \geq T_w > T_{ien}$ - regime de ebulição nucleada
- para $T_w \leq T_{ien}$ - regime de convecção para o líquido

onde:

- T_w - temperatura da parede
- T_{fcc} - temperatura de fluxo crítico de calor
- T_{ien} - temperatura de início de ebulição nucleada
- T_{fr} - temperatura de remolhamento

3. Métodos de Solução

A equação de condução de calor foi resolvida numericamente, pela técnica de aproximação em diferenças finitas. As seguintes condições de contorno foram utilizadas:

- (a) Foi especificado o contorno inferior do trecho (L_T) em estudo:

$$T(r, y=0) = T_{w1} \quad (3)$$

- (b) Foi especificado o contorno superior do trecho (L_T) em estudo:

$$T(r, y=L_T) = T_{w2} \quad (4)$$

(c) A superfície interior do encamisamento foi considerada adiabática:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_i} = 0 \quad (5)$$

(d) O fluxo de calor na superfície externo foi dado por:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_e} = h\Delta T \quad (6)$$

Uma vez estabelecidas as equações de diferenças para todos os pontos, obtêm-se um sistema de N equações algébricas com N temperaturas incógnitas que numa forma matricial representa-se por:

$$A \cdot \underline{T} = \underline{S} \quad \text{onde :}$$

A - matriz pentadiagonal

\underline{T} - vetor das temperaturas incógnitas

\underline{S} - vetor fonte

Para inversão da matriz A e solução do sistema usou-se uma variação do método de eliminação de Gauss, próprio para matrizes esparsas⁽²⁾.

Além do perfil de temperaturas, há mais duas incógnitas: a velocidade e o comprimento da frente de remolhamento. Portanto são necessárias mais duas condições: a temperatura de remolhamento, e a temperatura de início de ebulição nucleada. Adota-se, então, o seguinte método iterativo para resolução do problema:

- 1 - Estima-se a velocidade (v) e o comprimento da frente de remolhamento (L_{fr}) através de correlações da literatura, podendo-se, então, calcular o perfil de temperaturas no encamisamento.
- 2 - Com o perfil do passo 1, faz-se a previsão da velocidade e do comprimento, calculando-se um outro perfil de temperaturas.
- 3 - Interpola-se os valores de v e L_{fr} do passo 1 e 2 e calcula-se o perfil de temperaturas final. O ponto de remolhamento é fixo no trecho estudado, e o ponto de início de ebulição nucleada é conhecido através do comprimento da frente de remolhamento. Portanto, pode-se comparar os valores das temperaturas calculadas com os valores obtidos das condições,

caso estes não estejam próximos, repete-se o mesmo procedimento até o método convergir.

4. Resultados

Para facilitar o entendimento e identificação dos modelos na apresentação de figuras e discussão dos resultados, chamar-se-á de modelo A, aquele em que o perfil do h é constante em cada uma das três regiões consideradas, e de modelo B, aquele em que o perfil é modelado pela curva de ebulição.

Foi proposto um caso base com o objetivo de servir como referência na variação dos parâmetros de entrada do problema, bem como a comparação dos modelos entre si. Os dados que definem o caso base são:

- temperatura inicial da parede (T_w) = 600°C
- temperatura de saturação do fluido (T_{sat}) = 100°C
- temperatura de entrada do fluido (T_e) = 80°C
- material de encamisamento = aço inox
- velocidade do fluido na entrada = $1,5 \text{ mm/s}$

Uma vez definido o caso base fez-se uma comparação entre o modelo A e B:

- velocidade de remolhamento (v): as velocidades calculadas foram semelhantes, e de boa concordância com o ajuste feito por Duffey e Porthouse⁽⁴⁾, e foi justamente por este motivo, que este problema foi escolhido como referência; assim, pode-se comparar os demais parâmetros como o fluxo de calor, o comprimento da frente, etc.

$$v \begin{cases} 1,19 \text{ mm/s (Duffey e Porthouse}^{(7)}) \\ 1,078 \text{ mm/s (Modelo A)} \\ 1,039 \text{ mm/s (Modelo B)} \end{cases}$$

- comprimento da frente de remolhamento: obteve-se valores próximos entre os modelos e que se aproximam do valor dado por Sun et al⁽⁹⁾.

$$L_f \begin{cases} 5,000 \text{ mm (Sun et al}^{(9)}) \\ 5,160 \text{ mm (Modelo A)} \\ 4,888 \text{ mm (Modelo B)} \end{cases}$$

- perfil de temperaturas no encamisamento: uma comparação entre o perfil de temperaturas da superfície externa dos dois mode

los está mostrada na figura 5. As curvas são semelhantes, se bem que para o modelo A, o perfil tem uma inclinação pouco mais suave e, isto se deve ao perfil do coeficiente de transferência de calor do referido modelo.

- fluxo de calor: as curvas obtidas para o fluxo de calor encontram-se na figura 6. O modelo B é bastante semelhante à curva de ebulição, o fluxo aumenta após o regime de transição, já que o coeficiente de transferência de calor e a diferença de temperaturas (entre a parede e o fluido) crescem, mas no fenômeno estudado as condições de transferência de calor tornam-se cada vez mais precárias à jusante da frente de remolhamento causando um decréscimo no fluxo de calor. No modelo A, o fluxo aumenta até o ponto de remolhamento, quando há uma queda brusca, acompanhando o perfil do h.

Apresenta-se a seguir os efeitos causados pela variação de alguns parâmetros de entrada do problema:

- vazão: foi proposto para o modelo A um h fortemente dependente da vazão (modelo de Duffey e Porthouse). Como o modelo deste estudo é bem sensível ao h, a velocidade também depende da vazão. O modelo B varia com a vazão da mesma forma que o modelo A, porém de uma forma bem menos acentuada como se pode ver na figura 7.
- pressão: um evidente acréscimo na velocidade de remolhamento com a pressão foi observado por muitos investigadores. Este efeito é resultado de uma forte influência da pressão sobre a temperatura de remolhamento. Pela correlação de Henry, pode-se verificar a influência da pressão sobre esta temperatura. A figura B mostra que com o aumento da pressão (através da temperatura de saturação) há o aumento da velocidade de remolhamento.

Vários testes de parametrização com o sub-refriamento de entrada, a temperatura inicial da parede, e o material de encamisamento, foram realizados para ambos os modelos. Comparando-se com resultados disponíveis na literatura, os modelos A e B apresentaram resultados totalmente satisfatórios⁽²⁾ de modo geral.

Muitos trabalhos teóricos e experimentais são encontrados na

literatura sobre o remolhamento. Dentre estes, foram escolhidos alguns que podem ser confrontados com os modelos deste trabalho, ou seja, enquadram-se dentro das características impostas neste estudo. Apresenta-se, a seguir uma comparação com o modelo de Duffey e Porthouse⁽⁴⁾.

- Duffey e Porthouse reuniram vários pontos experimentais da literatura aos seus, e ajustaram esses pontos a duas curvas:

$$\text{para } \frac{G\varepsilon}{\pi D_b k_w} \leq 0,25 \quad v^* = 3T \frac{G\varepsilon}{\pi D_b k_w}$$

$$\text{para } \frac{G\varepsilon}{\pi D_b k_w} > 0,25 \quad v^* = 6T^* \frac{G\varepsilon}{\pi D_b k_w}$$

onde:

- G - vazão mássica (g/s)
 ε - espessura do encamisamento (cm)
 D_b - diâmetro da barra (cm)
 k_w - condutividade térmica da parede (w/cm C)
 T* - temperatura adimensional $(T_{fr} - T_{sat}) / (T - T_{fr})$
 v* - velocidade adimensional $(\rho_w c_{pw} \varepsilon v / k_w)$

A figura 9 mostra um excelente ajuste entre o modelo A deste trabalho aos pontos apresentados por Duffey e Porthouse. Já o modelo B tem uma região de coincidência com o ajuste, mas se mantém constante com a variação da vazão, e por isso se distancia com o aumento da mesma.

5. Conclusão

A maior parte de experiência sobre o remolhamento conseguem medir apenas a velocidade de remolhamento. Alguns parâmetros, como o coeficiente de transferência de calor e a temperatura de remolhamento, são indeterminados. Estes valores são muito difíceis de se prever e, as incertezas envolvidas em uma estimativa podem prejudicar a precisão obtida pelo modelo. Por causa disto, correlações empíricas para remolhamento descendente (top flooding) e remolhamento ascendente (botton flooding) baseados na vazão e nas temperaturas do refrigerante têm sido desenvolvidas. Estes parâmetros são

fáceis de se estimar, e portanto, estas correlações são mais aplicáveis para cálculos práticos da velocidade de remolhamento. Entretanto estas equações não levam em conta a física do problema. Modelos analíticos ou numéricos são muito importantes porque tratam do problema físico do remolhamento e permitem um melhor entendimento deste fenômeno complexo. Com este pensamento foram adotados modelos para h e a temperatura de remolhamento que melhor descrevam o fenômeno. O modelo A teve sucesso, e como se pode ver em testes feitos, ajusta-se muito bem aos resultados apresentados por Duffey e Porthouse⁽⁴⁾. O modelo B obteve resultados bons, apenas a baixas vazões, o que parece lógico uma vez que as correlações usadas, são para ebulição em piscina (pool boiling), onde a vazão de escoamento pode ser considerada igual a zero. Além disto, soma-se o fato de que aplica-se uma curva estática à uma situação altamente transitória. Existem vantagens e desvantagens de um método sobre o outro. Apesar do modelo A ter uma boa concordância com os dados experimentais em toda a faixa de vazão, o modelo B simula o fenômeno muito melhor fisicamente.

Sugere-se um aperfeiçoamento de uma expressão para o coeficiente de transferência de calor e para a temperatura de remolhamento que considere os efeitos de todos os parâmetros envolvidos no remolhamento.

Uma continuação deste trabalho deverá conter os efeitos do combustível nuclear e das propriedades variáveis dos materiais, tais como, a densidade, o calor específico e a condutividade térmica.

BIBLIOGRAFIA

1. ARRIETA, L. & YADIGAROGLU, G. Analytical model for bottom reflooding heat transfer in light water reactors. (The UCFLOOD code). Palo Alto, Calif. Electric Power Research Institute, Aug. 1978. (EPRI-NP-756).
2. BRAZ Fº, F.A. Simulação numérica do fenômeno de remolhamen to de um elemento de combustível. São Paulo, 1984. (Dissertação de Mestrado, IPEN).
3. CARBAJO, J.J. & SIEGEL, A.D. Review and comparison among the different models for rewetting in LWR'S. Nucl. Eng. Des., 58:33-44, 1980.
4. DUFFEY, R.B. & PORTHOUSE, D.T.C. The physics of rewetting in water reactor emergency core cooling. Nucl. Eng. Des., 25:379-94, 1973.
5. ELIAS, E. & YADIGAROGLU, G. The reflooding phase of the LOCA in PWR's Pt.2. Rewetting and liquid entrainment. Nucl. Safety, 19 (2):160-75, 1978.
6. HENRY, R. E. A correlation for the minimum film boiling temperature. AICHE Symp. Ser., 70 (138):81-90, 1974.
7. KIRCHNER, W. & GRIFFITH, P. Reflood heat transfer in a light water reactor. Am. Inst. Chem. Eng., 73 (164):51-62, 1977
7. SUN , H.H.; DIX, G.E.; TIEN, C.L. Cooling of a very hot vertical surface by a falling liquid film. J. Heat Transfer , 96:126-31, 1974. (Trans. ASME, C).



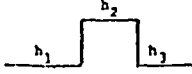
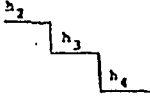
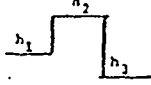

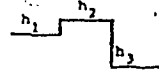
Referência	Dados experimentais correlacionados	Coefficiente de transferência de calor $1W/m^2 \text{ } ^\circ C$	Temperatura de resfriamento ($^\circ C$)	Perfil do coeficiente de transf. de calor
Yamanouchi	Yamanouchi	$h_2 = 2,1 \times 10^4 - 10^6$	150	
Emmerle e Martinet		$h_3 = 0$		
Sun et al.	Yamanouchi	$h_2 = 1,7 \times 10^4$	260	A refrigeração por ebulição é considerada
	Duffey e Porthouse	$h_3 = (h_2/n) \exp(-0,05z)$		
Jun et al.	Yamanouchi Duffey e Porthouse (somente dados a baixa vazão)	$h_1 = 570$ $h_2 = 1,7 \times 10^4$ $h_3 = 0$	260	A região de resfriamento fica entre o início da ebulição e a frente de resfriamento
				
Chun e Choo	Caso et al.	$h_2 = 2,56 \times 10^4$ $h_3 = 170$ $h_4 = 0$	260	O comprimento da região de escoamento disperso de gotas é calculado.
				
Ishii	Bennett et al.	$h_1 = h_{CHF}$ $h_2 = 4 \times 10^5$ $h_3 = 0$	260 - 350	A região de resfriamento fica entre o ponto de CHF e a frente de resfriamento. A faixa de pressão é de 6,9 a 69 bar.
				
Thompson	Bennett et al.	$h_2 = R \frac{AT_{SAT}^3}{\dots}$ $h_{max} = 7 \times 10^6$ $h_3 = 0$	$T_{SAT} + 100$	A faixa de pressão é de 6,9 a 69 bar.
				
Elias e Yedigazoglu	Duffey e Porthouse (somente dados a baixa vazão)	$h_1 = 170$ $h_2, h_3, h_4 \dots = \text{aproximação da curva de ebulição}$	250	
Andréoni	Andréoni	h_1 , de correlação de Jens - Lottes h_2 , de dados experimentais h_3 , de dados experimentais	$T_{SAT} + 200$	

Figura 1- Modelos unidimensionais (referência 5)

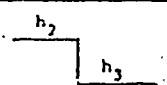
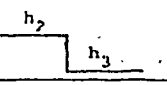
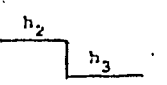
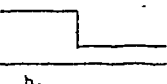
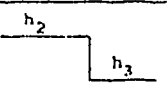
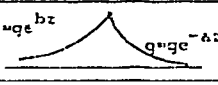
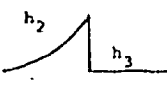
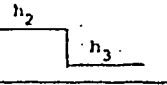

Referência	Dados experimentais correlacionados	Coefficiente de transferência de calor ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	Temperatura de resfriamento ($^\circ C$)	Perfil de coeficiente de transferência de calor e comentários
Duffey e Porthouse	Yoshioka e Hasewaga Yamanouchi Duffey e Porthouse Andrioni Martini e Premoli Thompson Campanile e Pozzi	$h_2 = 10^4 - 2 \times 10^6$ $h_3 = 0$	190 - 250	
Coney	Bennett et al.	$h_2 = 0,94 - 1,3 \times 10^6$ $h_3 = 0$	$T_{sat} + 68$	A faixa de pressão é de 6,9 a 69 bar. 
Blair	Thompson	$h_2 = 1,7 \times 10^4$ $h_3 = 0$	260	A geometria é cilíndrica. 
Yeh	Nenhum dado experimental correlacionado			A geometria é cilíndrica. 
Yoshioka e Hasewaga	Yoshioka e Hasewaga	$h_2 = \text{função da temperatura da parede e da velocidade da frente de resfriamento}$		
Edwards e Mather		$h_{max} = 2 - 4 \times 10^5$		
Thompson	Bennett et al.	$h_2 = R \Delta T_{sat}^3$	$T_{sat} + 100$	Solução numérica 
Tien e Yao	Nenhum dado experimental correlacionado.			Uso da técnica Wiener-Hopf 
Dua e Tien	Duffey e Porthouse Yamanouchi	$h_2 = 1,7 \times 10^4$ $q_3 = q_0 / (N \exp(-az))$		Uso da técnica de Wiener-Hopf com refrigeração precursora. 

Figura 2 - Modelos bidimensionais (referência 5)

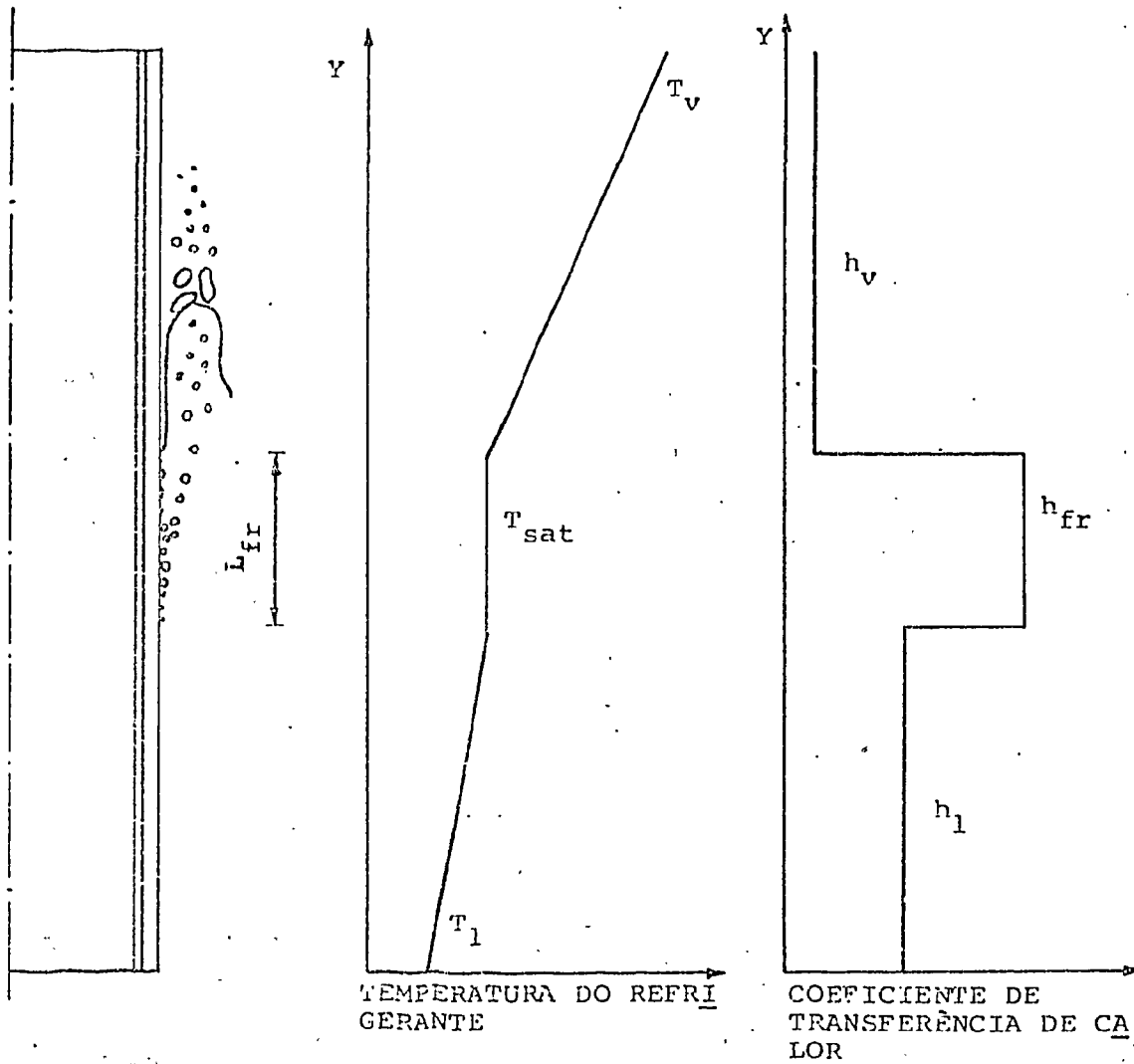


Figura 3 - Perfis da temperatura do refrigerante e do coeficiente de transferência de calor em função da cota, para o "modelo de três zonas".

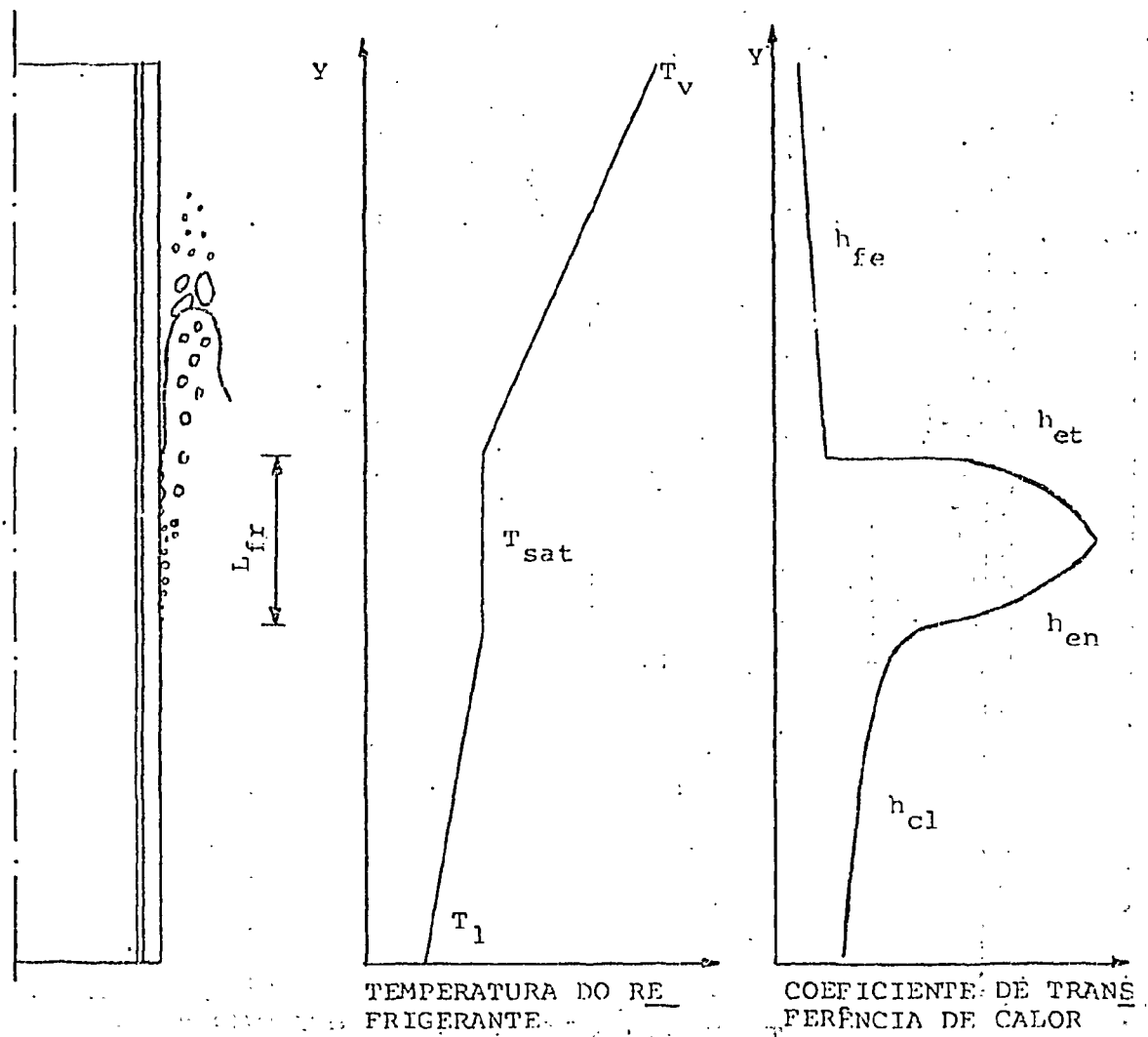


Figura 4 - Perfis da temperatura do refrigerante e do coeficiente de transferência de calor em função da cota, para o modelo recomendado por Kirchner e Griffith.

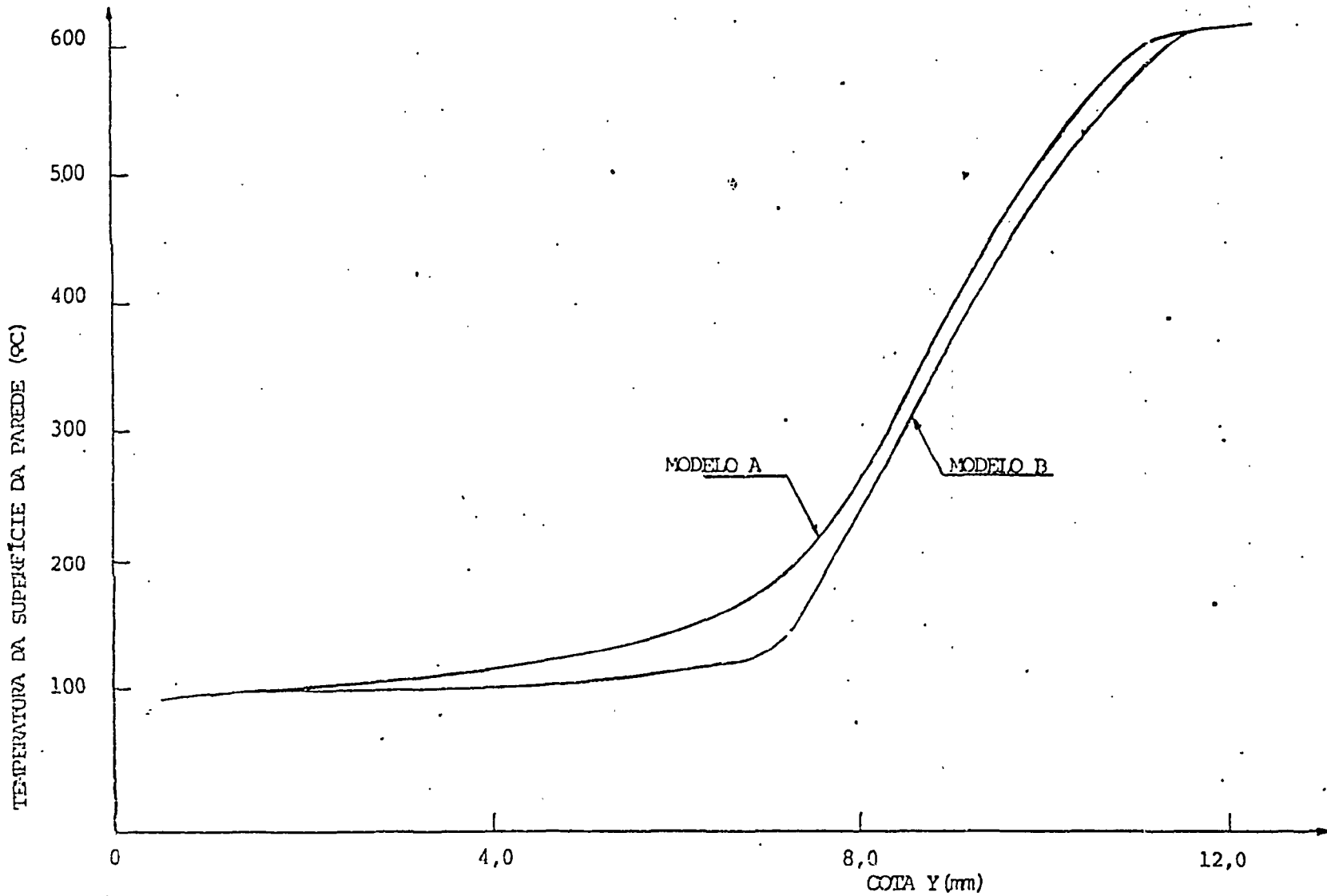


Figura 5 - Gráfico da temperatura superficial da parede em função da cota, utilizando os dados do caso de referência.

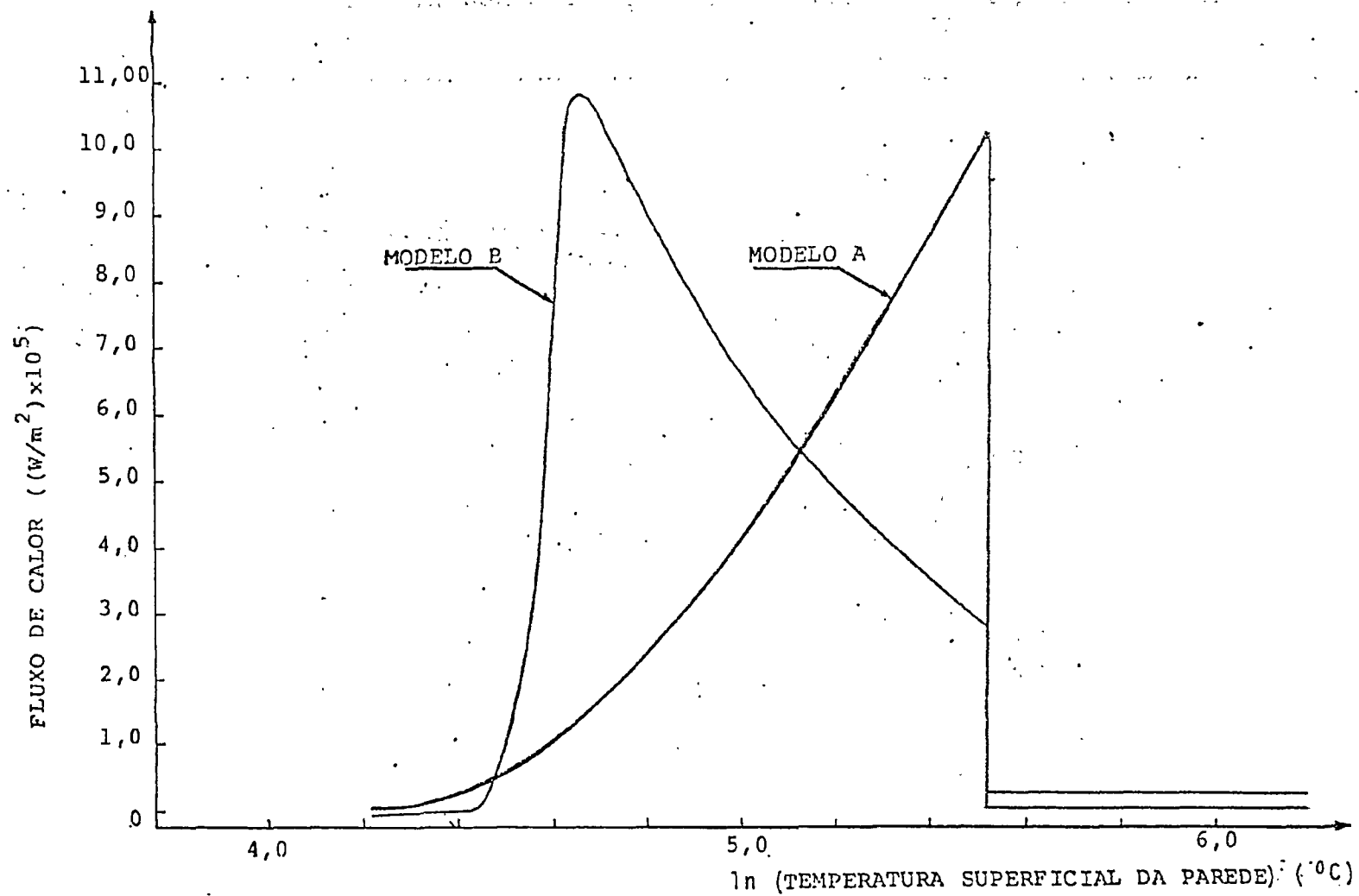


Figura 6 - Gráfico do fluxo de calor em função da temperatura superficial da parede, utilizando os dados do caso de referência.

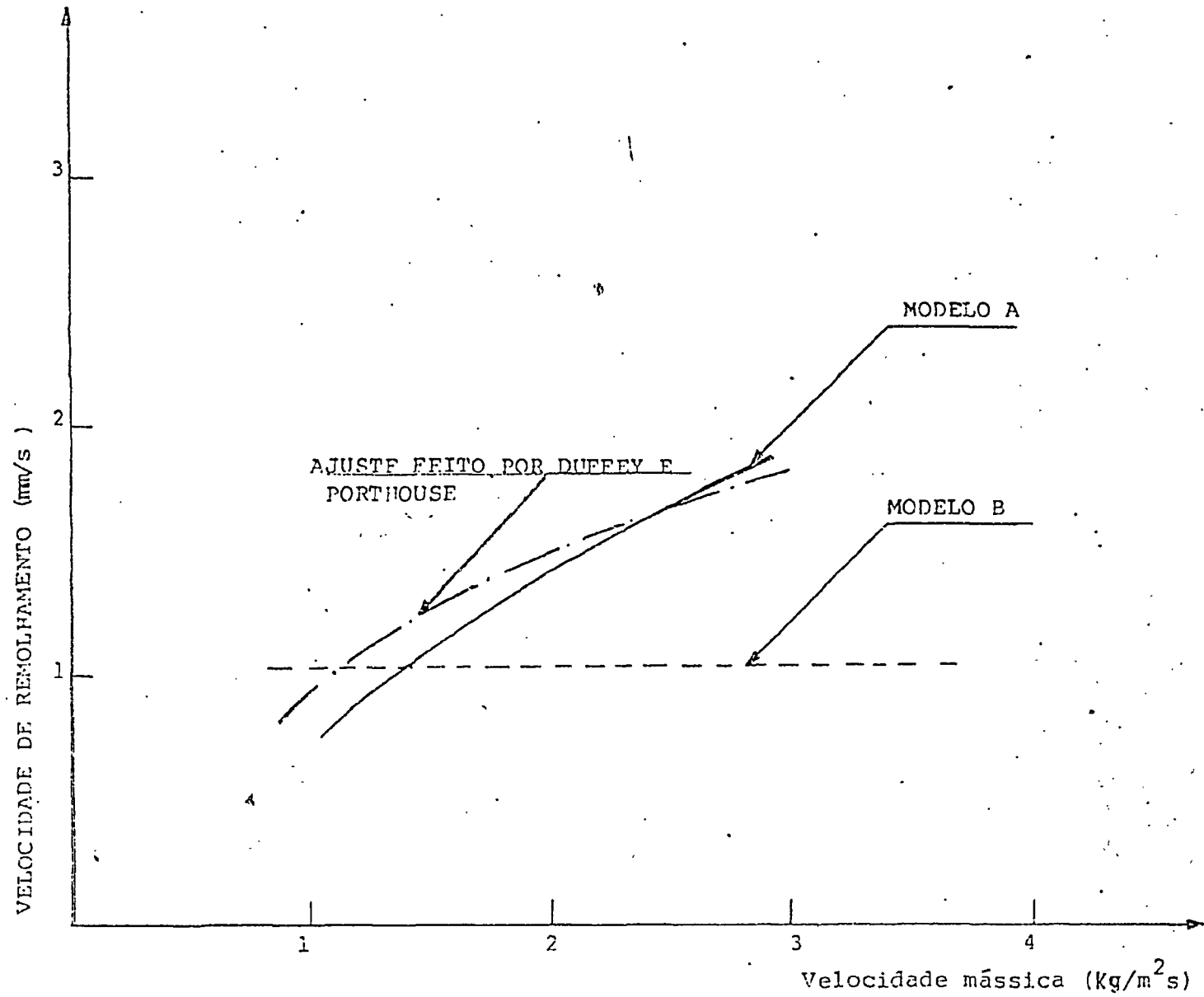


Figura 7 - Gráfico da velocidade de remolhamento em função da velocidade mássica na entrada, usando os dados restantes do caso de referência.

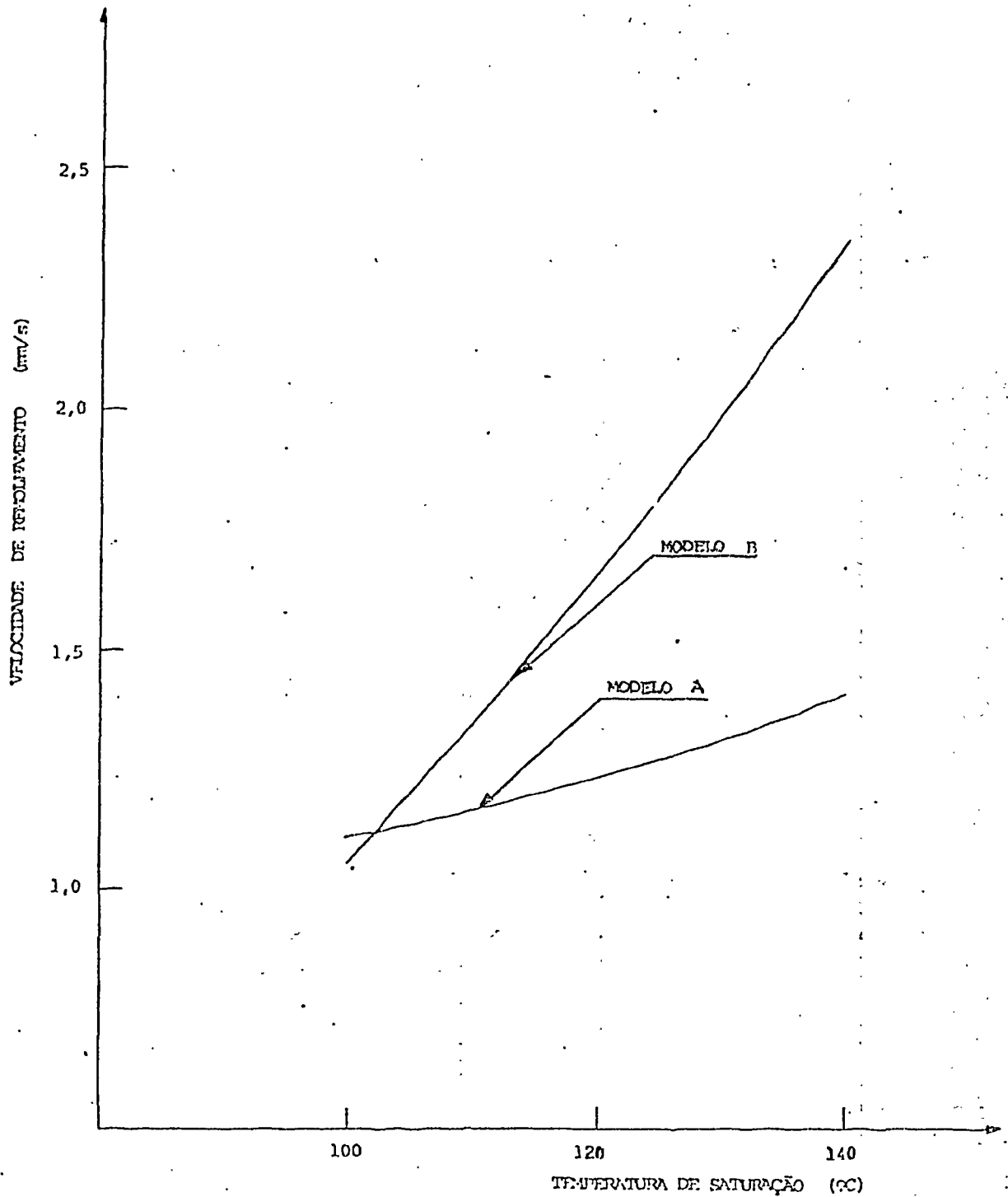


Figura 8 - Influência da pressão, através da temperatura de saturação, na velocidade de remolhamento, usando os dados restantes do caso de referência.

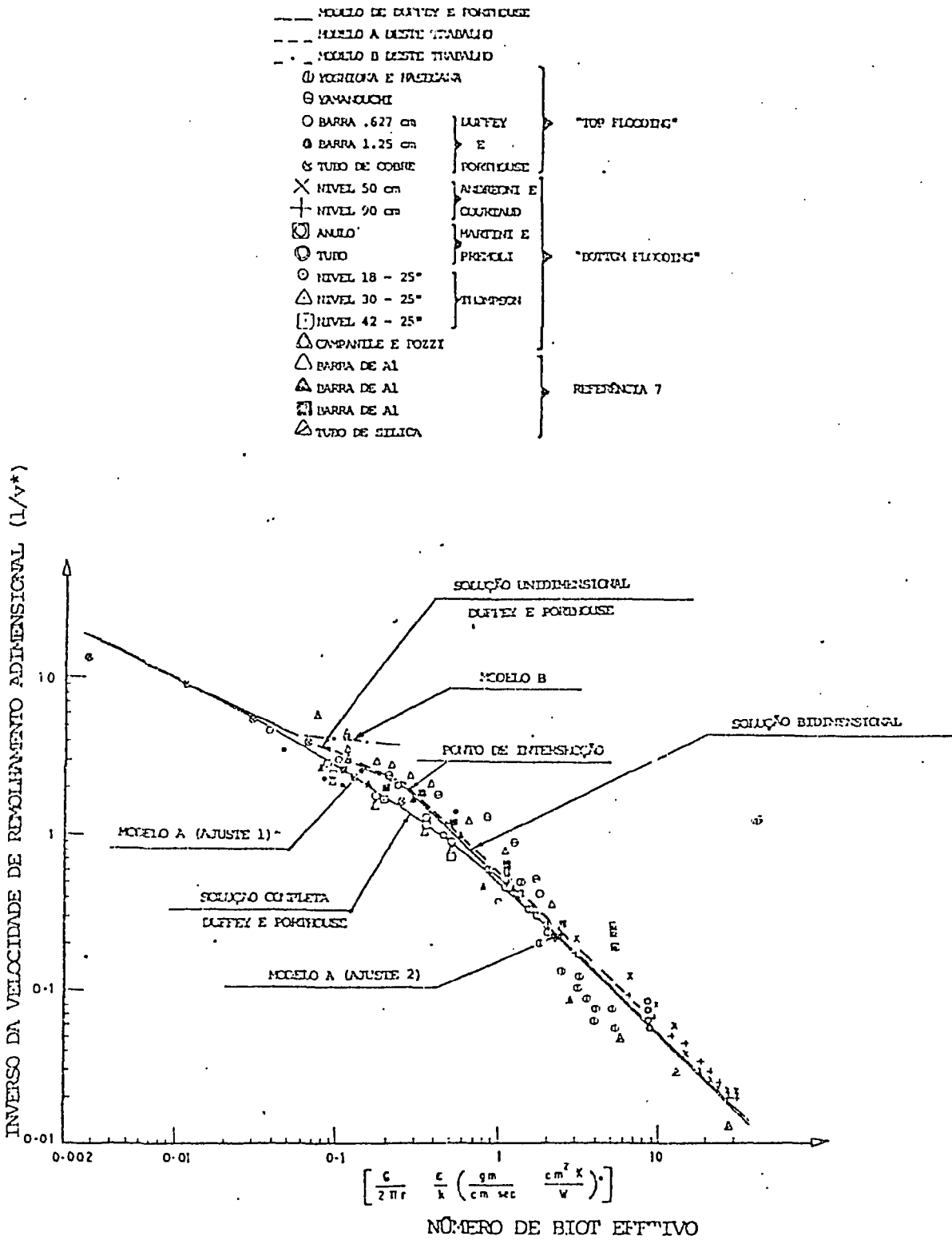


Figura 9.- Comparação dos modelos deste estudo com trabalhos experimentais e teóricos (figura tirada da referência 7).