

ESTUDO COMPARATIVO DE MODELOS DE FLUXO DE CALOR CRÍTICO

Ronaldo Célem Borges (IPEN/CNEN-SP)
Roberto Longo Freitas (IPEN/CNEN-SP)

RESUMO

O fluxo de calor crítico é um parâmetro de suma relevância no projeto de uma central nuclear, pois possibilita inferir a margem de segurança do projeto relativamente à integridade das barras combustíveis ou dos tubos que compõem o gerador de vapor. A condição do fluxo de calor crítico é caracterizada por uma forte redução do coeficiente local de transferência de calor gerando uma brusca elevação na temperatura da superfície da barra combustível ou do tubo do gerador de vapor, devido a substituição de líquido por vapor junto a parede adjacente. Este trabalho visa apresentar uma comparação entre os resultados calculados por várias correlações de fluxo de calor crítico disponíveis na literatura e aqueles obtidos a partir de experiências, abrangendo uma ampla faixa operacional relacionada à pressão, fluxo mássico e subresfriamento do fluido.

ABSTRACT

The critical heat flux is a very important parameter in the design of nuclear power plant, since it allows us to determine safety margins in the design of fuel rods and steam generator tube bundles. The phenomena of critical heat fluxes are characterized by a strong reduction of the local heat transfer coefficient giving rise to a sudden temperature increase at the fuel rod and steam generator tubes surfaces caused by the replacement of liquid by vapor near the walls. The present work presents a comparison between results obtained by the use of several critical heat flux correlations available in the literature with those resulting from experiments. The comparison is done for a wide range of operational conditions covering pressure, mass flux and coolant subcooling.

INTRODUÇÃO

O fluxo de calor crítico - FCC é um parâmetro de extrema importância no projeto de uma central nuclear, pois permite verificar a integridade das barras com bustíveis ou dos tubos do gerador de vapor.

O aparecimento do FCC é ocasionado pela substituição do líquido refrigerante por vapor junto a parede das superfícies aquecidas gerando assim, um acentuado aumento além dos limites aceitáveis da temperatura desta superfície.

O presente trabalho visa selecionar modelos para o cálculo do fluxo de calor crítico e compará-los com dados experimentais, abrangendo uma ampla faixa operacional em função da pressão, fluxo mássico e subresfriamento do fluido.

MODELOS DE FLUXO DE CALOR CRÍTICO

A partir de inúmeros trabalhos existentes na literatura sobre correlações de fluxo de calor crítico, uma avaliação criteriosa foi realizada visando selecionar correlações representativas para sua determinação.

Devido à exiguidade de espaço, as correlações consideradas neste trabalho não serão apresentadas em termos de fórmulas, face a extensão das mesmas bem como de seus parâmetros associados, a saber:

- i - Correlação de Bowring [1,2] ;
- ii - Correlação W-3 [3,4] ;
- iii - Correlação B&W-2 [3,5] ;
- iv - Correlação G&T [3,6,7] ;
- v - Correlação de Macbeth-1 [2,8] ;
- vi - Correlação de Macbeth-2 [3,9] ;
- vii - Correlação de Macbeth-3 [2].

Em geral, a aplicabilidade destas correlações está restrita às faixas operacionais para as quais as mesmas foram desenvolvidas, conforme apresentada na tabela 1.

Ressalta-se que a correlação original de Bowring [1] é também apresentada em uma forma alternativa [2]. Todavia, um estudo recente [10] mostrou discrepâncias significativas quando da comparação dos resultados obtidos pelas duas fórmulas. Assim, neste trabalho, adotou-se a correlação de Bowring na sua forma original.

RESULTADOS OBTIDOS

De posse das correlações selecionadas, desenvolveu-se um programa computacional para avaliá-las comparativamente com dados experimentais [11-12] abrangendo a seguinte faixa operacional: pressão = 137 bar, fluxo mássico = 500 - 5000 Kg/sm², diâmetro = 4,7 - 11,07 mm, título termodinâmico = -0,49 a +0,24, subresfriamento de entrada = 0 - 1398 KJ/Kg.

As figuras 1 a 7 mostram a comparação teórico-experimental das diversas

Tabela 1 - Faixa de validade das correlações de FCC.

Correlações	Parâmetros					
	Pressão-P (bar)	Fluxo mássico-G (Kg/sm ²)	Diâmetro-D (mm)	Comprimento-L (m)	L/D	Título - x
Bowring	2 - 190	136 - 18600	2,00 - 45,0	0,15 - 3,70		
W - 3	69 - 158	1356 - 6781	5,00 - 17,8	0,25 - 3,66		-0,15 ã +0,15
B & W -2	138 - 165	1017 - 5425	5,00 - 12,7	1,83		-0,03 ã +0,20
G & T	≤ 138	678 - 5425			21 - 468	neg. ã pos.
Macbeth-1	qualquer	135 - 1017				0 ã 1
Macbeth-2 G ≤ 1017 Kg/sm ² G > 1017 Kg/sm ²	qualquer 1 - 138	135 - 1017 1017 - 10443	2,54 - 23,9 2,54 - 23,9	0,15 - 3,12 0,15 - 3,12		neg. ã pos. neg. ã pos.
Macbeth-3		< 1017				

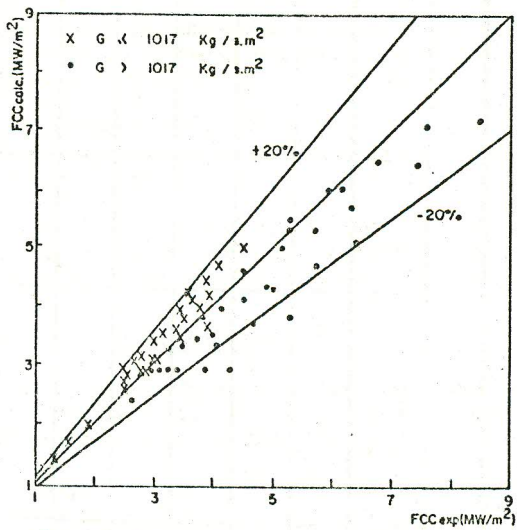


FIGURA 1 - Comparação entre a correlação de Bowring e resultados experimentais.

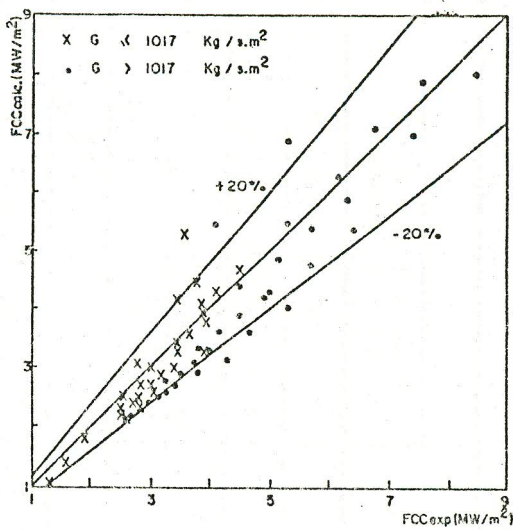


FIGURA 2 - Comparação entre a correlação W-3 e resultados experimentais.

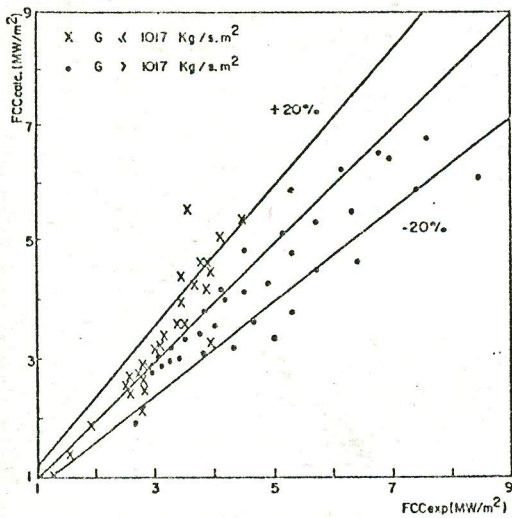


FIGURA 3-Comparação entre a correlação B&W-2 e resultados experimentais.

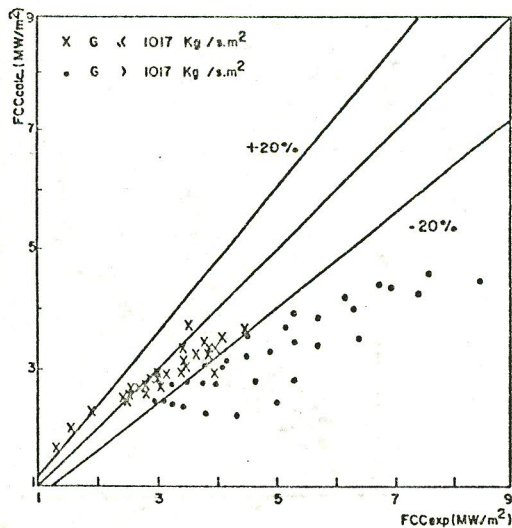


FIGURA 4-Comparação entre a correlação G&T e resultados experimentais.

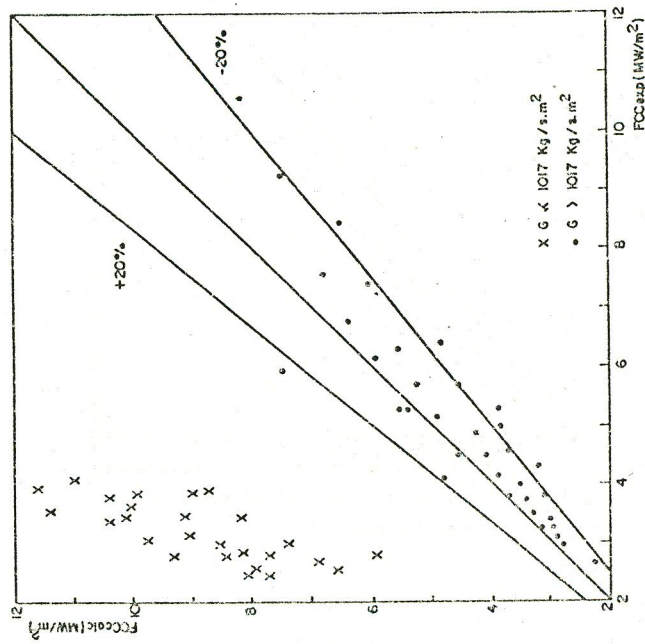


FIGURA 5 - Comparação entre a correlação de Macbeth - 1 e resultados experimentais.

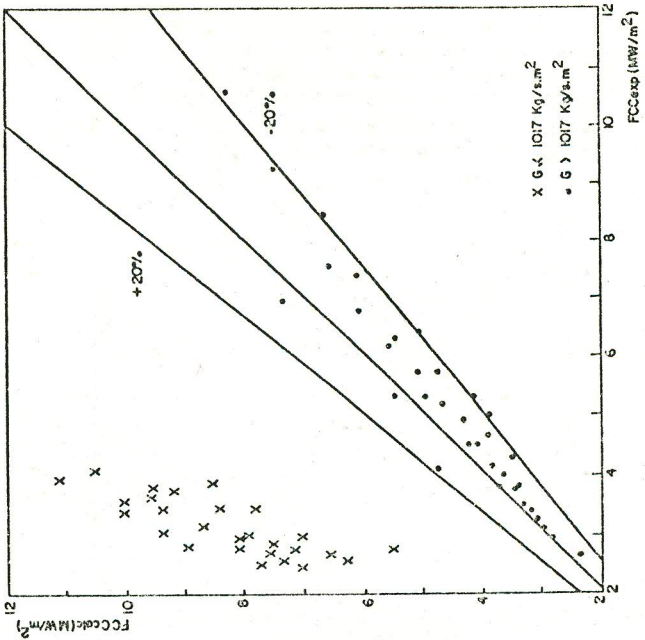


FIGURA 6 - Comparação entre a correlação de Macbeth - 2 e resultados experimentais.

correlações de fluxo de calor crítico selecionadas, observando-se que os dados experimentais foram divididos em alto e baixo fluxo mássico de forma análoga àquela estabelecida pela correlação de Macbeth-2 [3, 9].

Pode-se verificar das figuras 1 a 7 que todas as correlações, exceto as correlações de G&T [3,6,7] e de Macbeth-3 [2], apresentam resultados satisfatórios para a faixa de $\pm 20\%$ do FCC experimental relativamente aos dados de alto fluxo mássico.

Para os dados de baixo fluxo mássico, nota-se que todas as correlações, excetuando-se as de Macbeth-1 [2,8] e Macbeth-2 [3,9] apresentam resultados satisfatórios na faixa de $\pm 20\%$ do valor experimental. Ressalta-se também que a correlação de Macbeth-3 [2], desenvolvida especificamente para a faixa de baixo fluxo mássico não se mostrou muito satisfatória comparativamente as demais.

Uma análise criteriosa das figuras apresentadas mostra que, em toda a faixa de variação do fluxo mássico, as correlações de Bowring (figura 1), W-3 (figura 2) e B&W-2 (figura 3) são as que melhor representam o fluxo de calor crítico experimental. Entretanto, é importante evidenciar que as correlações W-3 e B&W-2, largamente utilizadas nos cálculos de reatores nucleares, embora desenvolvidas para altos fluxos mássicos representou satisfatoriamente os dados de baixo fluxo mássico.

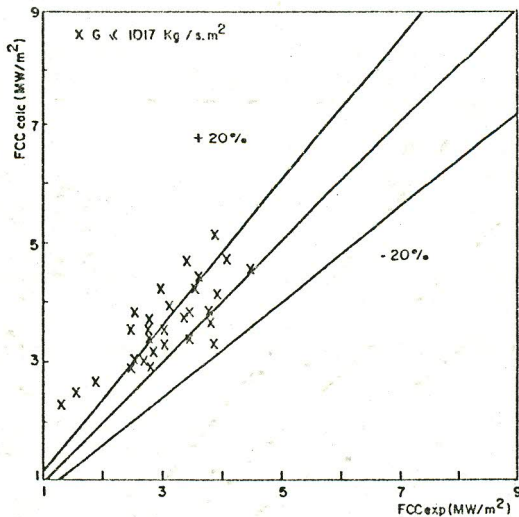


FIGURA 7- Comparação entre a correlação de Macbeth-3 e resultados experimentais.

CONCLUSÕES

Este trabalho selecionou modelos para o cálculo do fluxo de calor crítico confrontando-os com resultados experimentais variando com a pressão, fluxo mássico, diâmetro, comprimento, título termodinâmico e subresfriamento do fluido.

Dos modelos analisados, evidenciam-se as correlações de Bowring, W-3 e B&W-2 que representaram satisfatoriamente os dados experimentais dentro da faixa de $\pm 20\%$, independente da variação do fluxo mássico.

A fim de minimizar a incerteza quanto ao emprego de correlações de fluxo de calor crítico, é importante continuar comparando-as com mais dados experimentais e realizando experimentos visando, cada vez mais, fornecer meios para uma melhor avaliação dos fenômenos físicos envolvidos e aperfeiçoamento dos modelos existentes.

REFERÊNCIAS

- [1] R.BOWRING, "A Simple but Accurate Round Tube, Uniform Heat Flux, Dryout Correlation over the Pressure Range 0.7-17 MN/m² (100-2500 psia)", AEEW-R-789, U.K. Atomic Energy Authority, Winfrith, 1972.
- [2] J.G.COLLIER, Convective Boiling and Condensation, McGraw Hill, 1st. ed. , 1972; 2nd. ed., 1980.
- [3] L.S.TONG, Boiling Crisis and Critical Heat Flux, USAEC Critical Review Series, 1972.
- [4] L.S.TONG, Prediction of Departure from Nucleate Boiling for an Axially Non-Uniform Heat Flux Distribution", Journal of Nuclear Energy, 21, 241-248, 1967.
- [5] J.S.GELLERSTEDT; R.A.LEE; W.J.OBERJOHM; R.H.WILSON e I.S.STANEK, "Correlation of Critical Heat Flux on a Bundle Cooled by Pressurized Water", Two-Phase Flow and Heat Transfer in Rod Bundles, V.E.Schrock, Ed., ASME, New York, 1969.
- [6] K.M.GOLDMAN e D.E.THOMAS, USAEC Report, WAPD-MRP-92, Westinghouse Atomic Power Division, 1961.
- [7] Technical Progress Report-Pressurized Water Reactor Project, WAPD-MRP-93, 1961.
- [8] D.M.SNIDER, "Analysis of the Thermal-Hydraulic Behavior Resulting in Early Critical Heat Flux and Evaluation of CHF Correlation for the Semiscale Core", TREE-NUREG-1073, 1977.
- [9] R.V.MACBETH, "An Appraisal of Forced Convection Burnout Data", Boiling Heat Transfer in Steam-Generating Units & Heat Exchangers, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 180, pt. 3c, 1965-66.

- [10] R.C.BORGES e R.L.FREITAS, "Aplicação da Correlação de Bowring para o Cálculo do Fluxo de Calor Crítico", Anais do 1º Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Março 1986, vol. 1, 359-362, Associação Brasileira de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 1986.
- [11] Working Part of the Heat and Mass Transfer Section of the Scientific Council of the USSR Academy of Sciences, "Tabular Data for Calculating Burnout when Boiling Water in Uniformly Heated Round Tubes", Thermal Engineering, 23(9) 77-79, 1976.
- [12] B.THOMPSON e R.V.MACBETH, "Boiling Water Heat Transfer in Uniformly Heated Round Tubes: A Compilation of World Data with Accurate Correlations", AEEW-R-356, 1964.