

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE DO REFRIGERANTE NOS INTERNOS DE UM REATOR DO TIPO PWR

Ligia Maria Moretto Eberle
Departamento de Tecnologia de Reatores
IPEN - CNEN/SÃO PAULO

RESUMO

O projeto de um reator nuclear do tipo PWR requer o conhecimento da distribuição de velocidade do refrigerante através dos internos do reator, particularmente na região de entrada do núcleo. No presente trabalho propõe-se que tal escoamento seja tratado como potencial, tendo como equação que o rege o Laplaciano da função potencial de velocidade, cuja solução é obtida pelo método dos elementos finitos, adequado ao problema, tendo em vista a complexidade da geometria. Para esta solução utilizou-se o programa computacional ANSYS, desenvolvido e licenciado para cálculo estrutural e térmico, adotando a analogia entre a equação da condução de calor em regime estacionário e sem geração de calor, $\nabla^2 T = 0$ e o Laplaciano da função potencial de velocidade, $\nabla^2 \phi = 0$.

O método proposto foi aplicado ao reator nuclear de Angra-2, adotado como exemplo. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles apresentados na literatura, tanto provenientes de modelagem e cálculo analítico, como experimentais. Foram, também, comparados com aqueles obtidos em modelo em escala reduzida para o reator exemplo, tendo apresentado boa concordância. A análise realizada indica que o método proposto representa uma ferramenta válida na previsão da distribuição de velocidade do refrigerante nos internos de um reator PWR.

ABSTRACT

The thermohydraulic design of a pressurized water reactor requires the determination of the coolant flow distributions within the reactor vessel, particularly at the core inlet.

In this work it is proposed the study of this flow, using potential flow theory governed by Laplace's equation, $\nabla^2 \phi = 0$. The solution of the potential field is obtained by the finite element method, which simplifies considerably the treatment of complex geometrical configurations.

The equation is solved by the finite element computer code ANSYS, developed and licensed for structural and thermal analysis, by using the analogy between steady state heat transfer equation without heat generation, $\nabla^2 T = 0$, and Laplace's equation of the velocity potential.

The proposed method has been applied to a commercial reactor, and the results are consistent with the available experimental data.

INTRODUÇÃO

Em um reator nuclear para geração de energia moderado e resfriado por água leve pressurizada, os elementos combustíveis, acessórios e instrumentos estão contidos em um vaso, dispostos de tal forma que possibilitam muitos caminhos para as correntes de fluido. A parte principal destas correntes refrigera diretamente os elementos combustíveis passando através do núcleo, enquanto as demais tem a finalidade de resfriar os dispositivos internos do vaso.

Tendo em vista que há uma taxa de geração de energia no núcleo que deve ser convenientemente removida, é necessário que seja conhecido o comportamento do fluido, isto é, o modo de escoamento nos internos do vaso a fim de que se calculem os coeficientes de transferência e sejam determinadas as taxas de remoção de calor e os fatores de canal quente.

A potência no núcleo não é gerada à mesma taxa em todas as barras, nem em todos os elementos combustíveis, além de variar nas diferentes etapas de vida do combustível. Existe, portanto, uma determinada distribuição de geração de potência variável no tempo e no espaço, que deve ser removida adequada, segura e economicamente por uma conveniente distribuição de velocidade e vazão do refrigerante por elemento combustível. Deste modo, no projeto do reator deve ser prevista a distribuição de vazão do fluido dentro do núcleo, visando avaliar sua eficiência térmica. O fator de canal quente utilizado para uma análise conservativa do canal quente através do aumento da densidade de potência, contém sub-fatores associados com a má distribuição de vazão na entrada do núcleo que devem ser conhecidos.

A distribuição de vazão na entrada do núcleo utilizada com dados de entrada nos códigos computacionais que analisam a termohidráulica do núcleo, tem estado sob contínua revisão. Estudos experimentais tem sido feitos no sentido de explorar o modo de escoamento na região da barreira térmica e no pleno inferior, como também analisar o efeito das várias geometrias dos internos na distribuição do fluxo na entrada do núcleo.

Apesar de serem estes estudos parte de todo o projeto de um reator nuclear, relativamente poucos tem sido os resultados publicados. As informações disponíveis mostram que a questão tem sido enfocada ou através do uso de modelos experimentais para casos específicos e para a obtenção de correlações empíricas, ou através de tratamento analítico, apesar das limitações decorrentes da complexidade da geometria e, conseqüentemente, do escoamento.

O objetivo do presente trabalho é a aplicação de um programa computacional utilizando o método dos elementos finitos para a determinação de distribuição de velocidade do refrigerante nos internos de um reator PWR, em função da configuração geométrica dos internos. Este procedimento pode ser utilizado como ferramenta para o desenvolvimento do projeto dos internos.

MODELO TEÓRICO

A complexidade da geometria do escoamento do refrigerante nos internos de um reator nuclear tipo PWR tem levado os pesquisadores a utilização de técnicas experimentais com o uso de modelos em escala reduzida, os quais são particularmente valiosos para a exploração do comportamento de um sistema particular e também para a obtenção de dados e correlações para o uso no projeto de protótipos, especialmente quando os modelos matemáticos não existem ou são particularmente complexos. Dentre os trabalhos experimentais apresentados na literatura podem ser citados os das referências [1-7].

O estudo analítico para a distribuição de velocidades nos internos do vaso do reator, até o presente momento, tem sido feito essencialmente através da hipótese simplificadora do tratamento como escoamento potencial [8-11].

O presente trabalho utiliza a modelagem de escoamento potencial apresentada em 8,9 para o cálculo do campo de velocidade do refrigerante nos internos do reator.

A validade do tratamento de um escoamento como potencial restringe-se à região de fora da camada limite que se estabelece junto às fronteiras que confinam o fluido. A espessura da camada limite é função do regime de escoamento, diminuindo à medida em que cresce o número de Reynolds [12], o qual relaciona as forças inerciais e viscosas atuantes. No caso de escoamentos fortemente turbulentos, a região onde há grande influência das forças viscosas e, portanto, onde não é válida a hipótese potencial, restringe-se a uma fina região denominada subcamada laminar.

O escoamento do refrigerante nos internos do vaso do reator é um escoamento nitidamente turbulento, com elevados números de Reynolds.

As regiões de interesse para análise neste trabalho são as que antecedem a entrada do núcleo, uma vez que se deseja prever a distribuição de velocidades neste local. Neste estudo foi modelado o escoamento no downcomer e no plenum inferior, onde a hipótese "potencial" é válida, uma vez que a espessura da camada limite nestas regiões é significativamente menor do que a espessura de cada uma delas.

A espessura da camada limite no downcomer foi calculada considerando que o escoamento se dá num espaço anular, em regime turbulento, com um perfil universal de velocidade, conforme proposto em [12].

A região do plenum inferior é constituída por uma superfície esférica de grande raio de curvatura. De acordo com resultados experimentais [13], não há região de estagnação, a não ser no centro da calota esférica, que é uma região muito pequena comparada ao plenum todo. Segundo [12] um escoamento sujeito a um gradiente de pressão pode ser tratado como se fosse sobre uma placa plana, desde que não ocorra descolamento da camada limite, o que só ocorreria se houvesse um ponto sobre a superfície com velocidade nula e se houvesse um gradiente adverso de pressão. Como isto só ocorre em uma pequena região central do plenum inferior, a espessura da camada limite foi calculada como se se tratasse de uma placa plana.

Na formulação como escoamento potencial a equação a ser resolvida é o Laplaciano da função potencial:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

A equação (1), escrita em coordenadas cartesianas é:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

Como simplificação para a resolução deste problema, tendo em vista que a região de interesse é a entrada do núcleo, foram modeladas as seguintes re-

giões do reator: a) downcomer, modelado como um espaço anular vertical, com simetria axial; b) plenum inferior, modelado como uma calota esférica, também com simetria axial. Na região do núcleo, certamente a hipótese de escoamento potencial não é mais válida, tendo em vista que ela é constituída por varetas de combustível muito próximas entre si, contendo, axialmente, grades espaçadas. No entanto, considerando que o objetivo deste trabalho é desenvolver um modo de visualizar o comportamento das linhas de corrente e do campo potencial na entrada do núcleo, considerou-se esta região com a placa perfurada reguladora de fluxo, sobre a qual se apoia a estrutura suporte inferior do núcleo, a grade suporte e a placa perfurada do bocal inferior do elemento com combustível.

Tendo sido considerada simetria axial, o Laplaciano do potencial de velocidade, equação (2), pode ser escrito apenas considerando as direções x e y , em coordenadas cartesianas, tendo y e x as direções do eixo do vaso e do raio, respectivamente:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

cujas soluções são obtidas com as seguintes condições de contorno:

c.c.1: $\phi = 0$ na região acima do núcleo, onde a velocidade passa a ter componente somente na direção vertical. Esta consideração é feita visando obter um referencial para o valor do potencial de velocidade.

$$\phi(x, y = \text{saída}) = 0 \quad (4)$$

c.c.2: A velocidade na entrada da seção modelada (downcomer) é uniforme e vertical. Segundo a referência [9] a velocidade do escoamento se torna quase uniforme a uma distância vertical igual a 1,2 vezes o raio externo do downcomer abaixo do bocal. No reator exemplo a distância do eixo do bocal até o final do downcomer é 2,7 vezes este raio. Resultados experimentais em modelo deste reator indicam que muito antes de atingir o plenum inferior a velocidade já é completamente vertical.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \text{ entrada} = 0 \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} \text{ entrada} = v_0 \quad (5)$$

c.c.3: Não há escoamento na direção normal às superfícies sólidas, portanto o gradiente do potencial nesta direção é nulo.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} \text{ fronteira} = 0 \quad (6)$$

A análise térmica do programa computacional ANSYS [14] é aplicada para resolver o problema da distribuição de temperatura em um corpo, em regime estacionário ou permanente, podendo ser incluídos fenômenos de condução, convecção, radiação e geração interna de calor, com propriedades dos materiais ortotrópicos e dependentes da temperatura.

A equação básica para a análise térmica em regime permanente é a equação de Poisson com a temperatura como incógnita. A equação de campo é da forma:

$$(k \nabla^2) = C \quad (7)$$

onde: K: condutividade térmica; ∇^2 : temperatura e C: calor gerado.

Esta equação básica pode ser escrita como:

$$[K] \{T\} = \{Q\} \quad (8)$$

onde:

[K] : matriz de condutividade térmica, incluindo os termos equivalentes de convecção e radiação nas faces;

{T} : vetor de temperatura nodal;

{Q} : vetor de taxa de transferência de calor, incluindo fluxo de calor aplicado, geração interna e convecção.

O programa ANSYS pode ser usado para resolver várias diferentes classes de problemas usando a analogia possível entre problemas governados pela mesma equação de campo, desde que se faça uma substituição mental dos nomes das variáveis. Como foi mostrado anteriormente, o escoamento potencial descrito pela equação (1) é matematicamente análogo ao fenômeno térmico descrito por (7), de modo que o problema do campo potencial pode ser resolvido dentro do programa como um campo térmico, fazendo-se a seguinte correspondência entre variáveis:

Análise Térmica	Escoamento Potencial
T = : Temperatura	ϕ : potencial de velocidade
K : condutividade térmica	1
C : calor gerado	0
$\partial T / \partial x$: gradiente de temperatura	$\partial \phi / \partial x$: velocidade do fluido
q : taxa de transferência de calor (heat flow)	vazão volumétrica
$q_x = -KA \frac{\partial T}{\partial x}$	$(\dot{m} / \rho)_x = A \partial \phi / \partial x = A v_x$

Assim, a distribuição de temperatura e as linhas isotérmicas obtidas representam o campo potencial e as linhas equipotenciais. As linhas de corrente são perpendiculares as equipotenciais e o gradiente de temperatura em cada ponto representa a distribuição de velocidades.

RESULTADOS

O reator adotado como exemplo para a modelagem aqui proposta foi o reator da Usina Nuclear de Angra - 2 com as dimensões dadas em [13] e com a região modelada mostrada na figura (1).

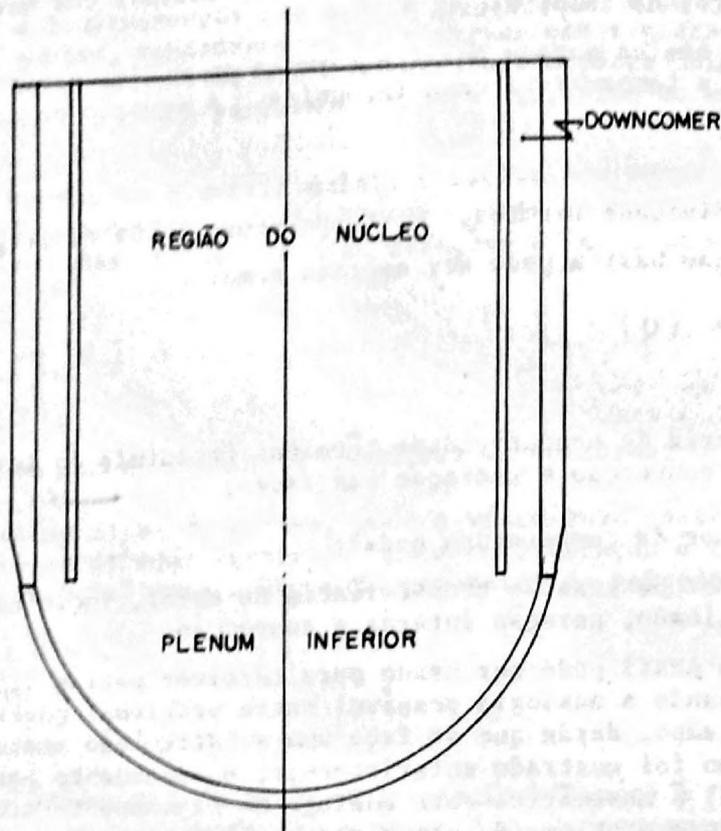
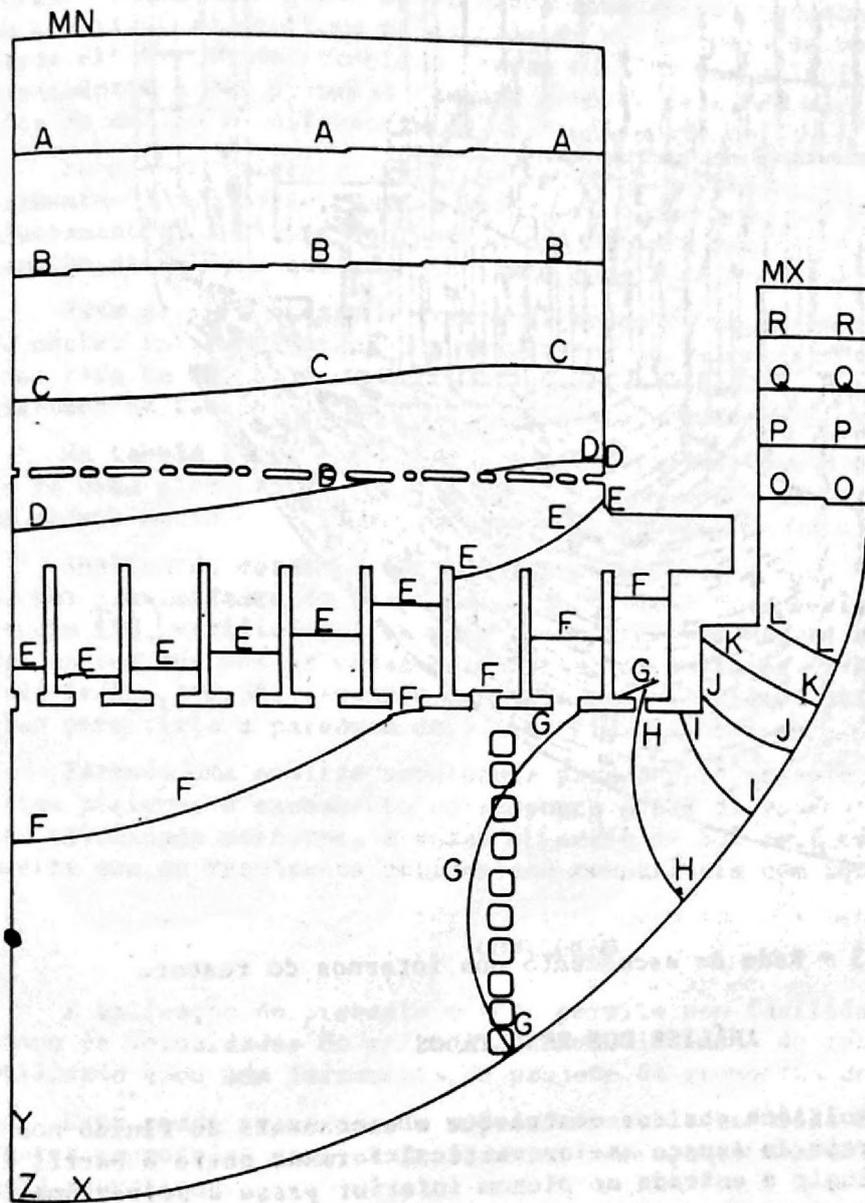


Figura 1 - Esquema da região modelada do vaso do reator exemplo.

Os resultados obtidos estão mostrados na figuras a seguir.

Na figura (2) estão mostradas as linhas equipotenciais do campo de velocidades nos internos do reator, o qual é dado numericamente como a distribuição de temperaturas nos nós da malha de elementos finitos construída.

As velocidades do escoamento são dadas numericamente pelo gradiente de temperatura no centróide de cada elemento, sendo listadas em módulo; estas mesmas velocidades estão representadas vetorialmente na figura (3) como um segmento de reta cuja direção é a do gradiente de temperatura, isto é, da velocidade, e cujo tamanho é proporcional ao módulo da velocidade. Considerando que as linhas de corrente são tangentes ao vetor velocidade, a partir da figura (3) pode-se visualizar não só as linhas de corrente, como também a própria rede do escoamento, visto que nela estão representadas as linhas equipotenciais.



A= 905096	G= 6335714	
B= 1810199	H= 7240817	
C= 2715302	I= 8145920	O= 13576538
D= 3620405	J= 9051023	P= 14481641
E= 4525508	K= 9956126	Q= 15386744
F= 5430611	L= 10861223	R= 16291847

Figura 2 - Campo potencial de velocidade do escoamento nos internos do reator.

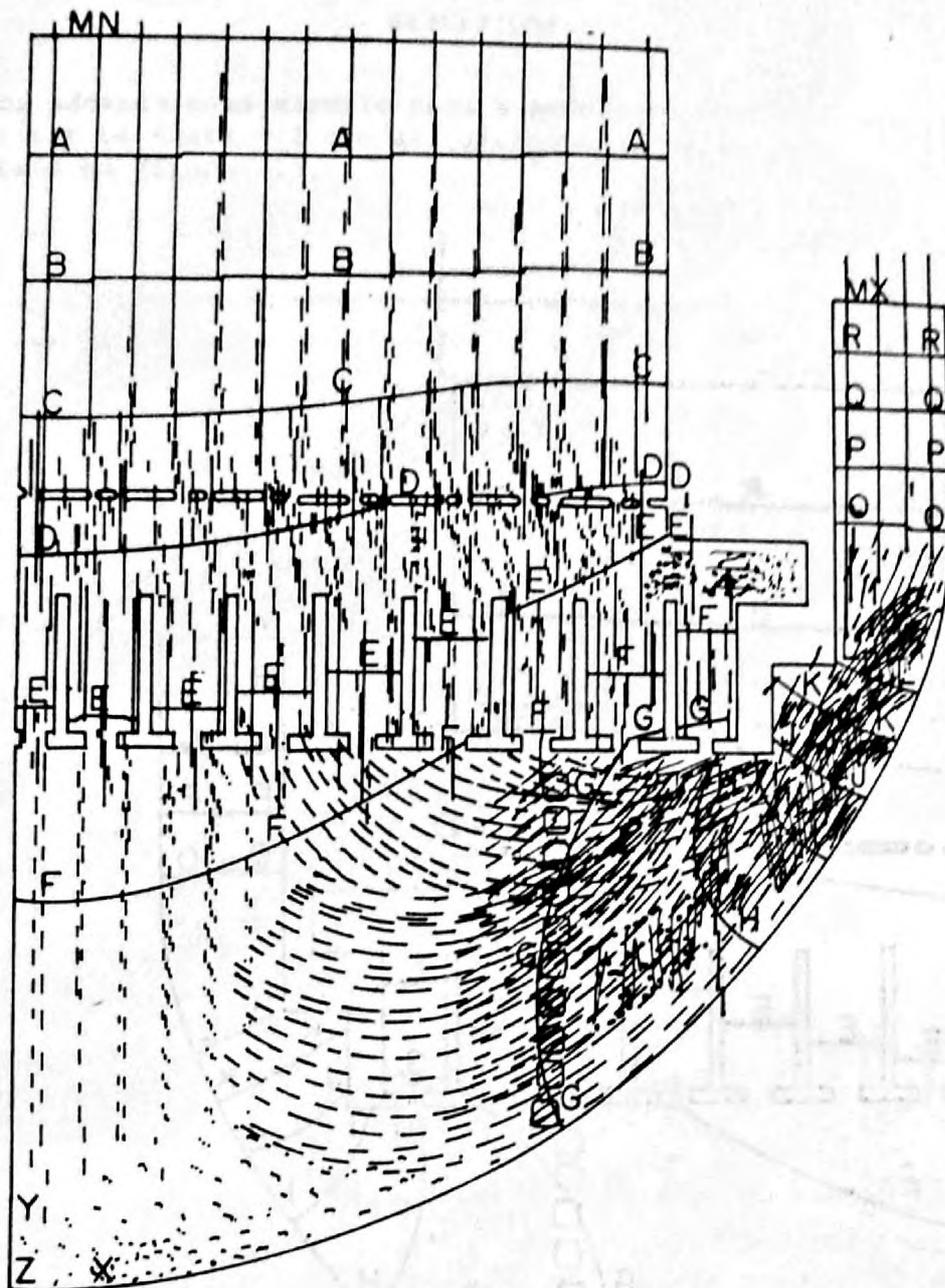


Figura 3 - Rede do escoamento nos internos do reator.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos mostra que o escoamento do fluido nos internos do reator a partir do espaço anular vertical formado entre o barril e o vaso do reator, ao atingir a entrada do plenum inferior passa a sofrer uma aceleração na região mais afastada do centro do vaso e tem sua velocidade reduzida na zona central. Após a mudança de direção no plenum inferior, o fluido escoava para cima em direção ao núcleo com uma velocidade maior na região mais afastada do centro, isto é, próxima à parede do barril, tendendo a um perfil mais uniforme à medida em que o escoamento prossegue dentro do cilindro que simula o núcleo. Este comportamento na distribuição de velocidades é previsto em

[9], onde é modelado um reator semelhante, sendo obtido analiticamente o campo de velocidades.

Em [13] estão apresentados os resultados obtidos para a distribuição de velocidades nos internos de um modelo experimental em escala reduzida de An-2, usando ar como meio fluido. Os resultados mostram que o escoamento após a entrada nos bocais assimetricamente posicionados é amplamente igualizado no downcomer antes de atingir o plenum inferior. A mesma referência diz, ainda, que a deflexão causada pela base do plenum inferior e pelos internos constituídos pela saia reguladora de fluxo, estrutura suporte, placa distribuidora inferior e bocal do elemento combustível reduzem a não uniformidade na distribuição do fluxo na entrada do núcleo para um valor abaixo de $\pm 15\%$. Estas diferenças de velocidade serão equalizadas pela influência das grades espaçadoras e das próprias varetas combustíveis, de modo que na parte superior do núcleo as diferenças de velocidade são totalmente compensadas.

No plenum inferior verificam-se velocidades bastante reduzidas, particularmente na sua parte central inferior, o que pode ser observado pelo grande afastamento das linhas equipotenciais naquela região, na figura (2) e pelo tamanho das linhas que representam o módulo do vetor velocidade na figura (3).

Para particularizar a distribuição de velocidades na região de entrada do núcleo foram extraídos dos resultados os valores de velocidade necessários para se desenhar o perfil de velocidade naquela região, os quais estão listados na tabela 1 e apresentados graficamente na figura (4).

Na tabela 1 pode-se observar os valores do desvio percentual da velocidade de em cada elemento em relação à velocidade média na região de entrada, tendo um desvio médio de $\pm 14\%$, com boa concordância com os da referência [13].

Analisando estes mesmos resultados observa-se que há um pico de velocidade nas proximidades da barreira térmica, conforme previsto em [9]. Na referência [10] verifica-se que para geometrias semelhantes este pico de velocidade faz com que 66% da vazão escoe entre as posições $(r/R_{ext})=0,6$ e o barril, onde $(r/R_{ext})=0,86$, enquanto que, com uma velocidade uniforme esta mesma região permitiria a passagem de 52% do fluxo global.

Fazendo uma análise semelhante para o caso exemplo, observa-se que entre estas posições o escoamento corresponde a 69% da vazão total, enquanto que com velocidade uniforme, a vazão aliseria de 50% do total. Esta observação mostra que os resultados obtidos são compatíveis com aqueles da literatura.

CONCLUSÃO

A aplicação do presente método permite com facilidade a visualização do campo de velocidades do refrigerante nos internos do reator, o que pode ser utilizado como uma ferramenta de projeto da geometria dos internos.

Está sendo preparado um modelo em escala reduzida de um reator com diferentes geometrias dos internos, a partir do qual a modelagem aqui proposta será reavaliada.

Tabela 1 - Velocidades na região imediatamente após a placa perfurada do bocal do elemento combustível (região de entrada do núcleo).

ELEMENTO Nº	POSICÃO ⁽¹⁾ r (mm)	VELOCIDADE v (m/s)	VAZÃO (mm ³ /s.rad)	r/Re ⁽²⁾	v/v̄ ⁽³⁾	DESVIO DA MÉDIA %
530	57,5	2,08	1,38 x 10 ⁷	0,034	0,83	- 17,5
540	172	2,17	4,32 x 10 ⁷	0,100	0,86	- 13,9
550	287	2,20	7,25 x 10 ⁷	0,166	0,87	- 12,7
560	402	2,22	10,26 x 10 ⁷	0,233	0,88	- 11,9
570	517	2,25	13,33 x 10 ⁷	0,300	0,89	- 10,7
580	632	2,29	16,58 x 10 ⁷	0,366	0,91	- 9,1
590	747	2,33	19,20 x 10 ⁷	0,433	0,92	- 7,5
600	862	2,38	23,38 x 10 ⁷	0,500	0,94	- 5,6
610	977	2,45	27,19 x 10 ⁷	0,566	0,97	- 2,8
620	1092	2,55	31,56 x 10 ⁷	0,633	1,01	1,2
630	1207	2,66	36,42 x 10 ⁷	0,700	1,06	5,6
640	1322	2,82	41,23 x 10 ⁷	0,766	1,12	11,9
650	1437	2,98	48,72 x 10 ⁷	0,833	1,18	18,3
660	1552	3,24	57,41 x 10 ⁷	0,900	1,29	28,6
670	1667	3,23	61,86 x 10 ⁷	0,966	1,28	28,2

(1) Posição radial do centróide do elemento

(2) Re é o raio interno da barreira térmica, 1725 mm

(3) \bar{v} é a velocidade média que vale 2,52 m/s

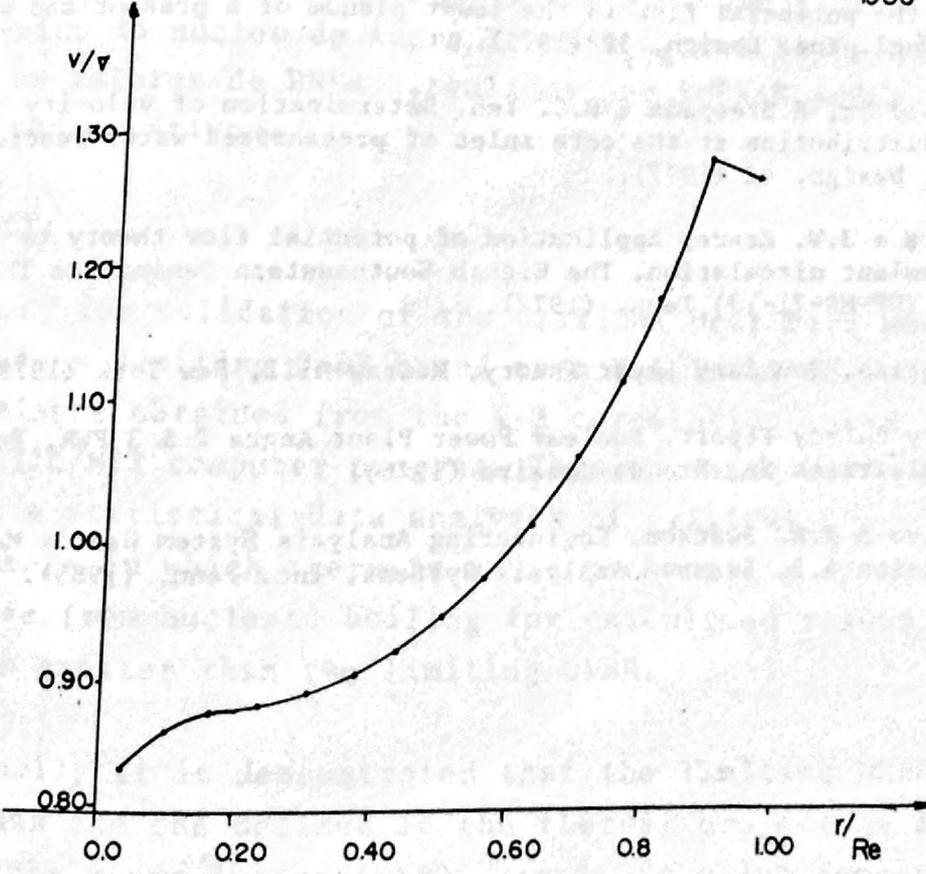
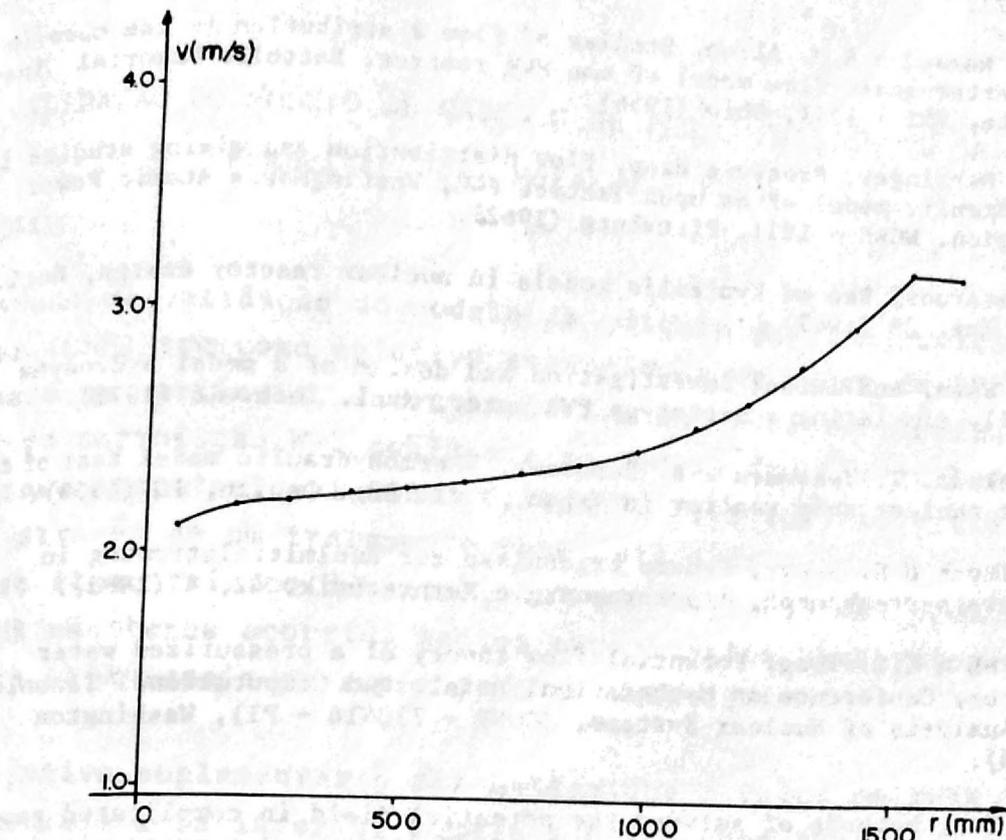


Figura 4 - Perfil de velocidade na região de entrada do núcleo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L.J. Flanigan et all, Studies of flow and mixing in 0.4 scale model of the PWR core 2 reactor, Battelle Memorial Institute, BMI - 1582, Ohio (1962).
- [2] H.R. Hazard e R.M. Allen, Studies of flow distribution in the core in a quarter-scale flow model of the PWR reactor, Battelle Memorial Institute, BMI - 1141, Ohio (1956).
- [3] R.T. Berringer, Pressure drop, flow distribution and mixing studies in a hydraulic model of an open lattice PWR, Westinghouse Atomic Power Division, WCAP - 1921, Pittsburg (1962).
- [4] G. Hetsroni, Use of hydraulic models in nuclear reactor design, Nucl. Sci. Eng. 28 (1967).
- [5] E.U. Khan, Analitical investigation and design of a model hydrodyna - mically simulating a prototype PWR core., Nucl. Tech. 16 (1972).
- [6] Y. Takada, T. Yokomura e A. Kurosawa, Thermohydraulic model test of the first nuclear ship reactor in Japan, Nucl. Eng. Design, 10 (1969).
- [7] G. Ulrych e E. Weber, Neuere Ergebnisse zur Kuhlmittelstromung in Druckwasserreaktoren, Atomkernenergie Kerntechnik, 42, 4 (1983).
- [8] H.C. Yeh e L.S. Tong, Potential flow theory of a pressurized water reactor, Conference on Mathematical Models and Computational Techniques for Analysis of Nuclear Systems, (CONF - 730414 - PI), Washington (1973).
- [9] H.C. Yeh, Methods of solving the potential field in complicated geome - tries and the potential flow in the lower plenum of a pressurized water reactor, Nucl. Eng. Design, 32 (1975).
- [10] E.V. Mcassey Jr, S.Sreepada e H.C. Yeh, Determination of velocity and pressure distribution at the core inlet of pressurized water reactors, Nucl. Eng. Design, 42 (1977).
- [11] S.D. Harris e J.W. Reece, Application of potential flow theory to a reactor coolant circulation, The Eighth Southeastern Seminar on Thermal Sciences, (DP-MS-71-13) Tenn. (1972).
- [12] H. Schlichting, Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, New York (1979).
- [13] Preliminary Safety Report, Nuclear Power Plant Angra 2 & 3 PWR. Furnas - Centrais Elétricas SA, Rio de Janeiro (1976).
- [14] G.J. Desalvo e J.A. Swanson, Engineering Analysis System User's Manual, ANSYS Revision 4.2, Swanson Analysis Systems, Inc. Penn. (1985).