

# PUC

ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS DE PROJETO  
TERMOHIDRÁULICO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS  
DE REATORES LMFBR

Relatório Interno - DEM-06/81

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
RIO DE JANEIRO - BRASIL**

**ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS DE PROJETO  
TERMOHIDRÁULICO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS  
DE REATORES LMFBR**

**Relatório Interno - DEM-06/81**

Relatório Interno - DEM-06/81

ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS DE PROJETO  
TERMOHIDRÁULICO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS  
DE REATORES LMFBR

Autores: Eloi Ferrandez y Fernandez  
Pedro Carajilescov

PESQUISA/TAREFA  
ANÁLISE TERMOHIDRÁULICA DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DE LMFBR  
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - (CNEN)

Setembro de 1981

ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS DE PROJETO  
TERMOHIDRÁULICO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS  
DE REATORES LMFBR

por

Eloi Fernandez y Fernandez  
Pedro Carajilescov

SUMÁRIO

A perspectiva de emprego de reatores rápidos refrigerados a metal líquido (LMFBR) tem recebido uma atenção crescente por parte dos órgãos responsáveis pelo desenvolvimento energético-nuclear em todo o mundo. No Brasil, recentemente, a CNEN vem tentando incentivar o desenvolvimento de pesquisas no setor, através do Programa "Pesquisas e Desenvolvimento no Campo Nuclear - Reactores Rápidos".

Este trabalho tem por objetivo <sup>Análise</sup> ~~analisar~~ o atual estado da arte (analítico e experimental) dos métodos de projeto termohidráulico de elementos combustíveis típicos de reatores LMFBR.

Sugere-se um programa de desenvolvimento no setor, a fim de obter-se um código computacional para modelar a distribuição de entalpia do fluido refrigerante no núcleo do reator. Tal programa encontra-se em desenvolvimento. (autor)

## INDICE

	Pag.
1- INTRODUÇÃO .....	01-02
2- COLOCAÇÃO DO PROBLEMA .....	03-08
3- REVISÃO DA LITERATURA .....	09-21
3.1. <u>Estudos Analíticos</u> (códigos computacionais) ...	09
3.1.1. COBRA III-C .....	09
3.1.2. THI-3D .....	12
3.1.3. COMMIX .....	12
3.1.4. Métodos Simplificados .....	14
3.2. <u>Estudos Experimentais</u> .....	17
3.2.1. Pressão Estática .....	17
3.2.2. Tensão de Cisalhamento .....	19
3.2.3. Velocidade Axial nos Subcanais .....	19
3.2.4. Escoamento Transversal .....	20
3.2.5. Temperatura .....	21
4- COMENTÁRIOS E SUGESTÕES .....	22-24
REFERÊNCIAS .....	25-28

## 1- INTRODUÇÃO

A perspectiva de emprego de reatores rápidos refrigerados a metal líquido (LMFBR - Liquid Metal Fast Breeder Reactors) tem recebido uma atenção crescente por parte dos órgãos responsáveis pelo desenvolvimento energético-nuclear em todo o mundo.

Tendo em vista a decisão brasileira de realizar um programa nuclear de finalidades pacíficas [1] e que os reatores rápidos tem como principal característica a utilização mais racional do ciclo nuclear, até o final da próxima década deverão estar entrando em funcionamento os primeiros reatores desse tipo em território brasileiro.

Os elementos combustíveis dos reatores nucleares, empregados para geração de potência, consistem em feixes de barras através dos quais escoam um fluido refrigerante. O escoamento do fluido e a transferência de calor no feixe de barras são fenômenos bastante complexos e a compreensão básica desses fenômenos é essencial para determinar o melhor desempenho durante as condições normais de operação e manter a integridade da estrutura durante condições acidentais.

Um meio tradicional para obter informações detalhadas sobre o desempenho desses reatores é construir e testar um modelo, onde são feitas medidas da velocidade, pressão e temperatura nas faixas das condições de operação desejada. Baseado nessas medidas, correlações e coeficientes de transferência de calor, distribuições de velocidade e de perda de carga como funções do número de Reynolds, geometria, etc., são desenvolvidas. Esse método, entretanto, possui diversas limitações: para cada geometria considerada, uma nova seção de teste deve ser montada e as correlações obtidas são válidas apenas nas faixas dos parâmetros testados.

Um método alternativo é o desenvolvimento direto de soluções numéricas das equações da continuidade, energia e quantidade de movimento, com as correspondentes condições de contorno e iniciais. Estes métodos, no entanto, normalmente também ficam sujeitos a informações experimentais do escoamento.

Este texto apresenta uma revisão dos métodos utilizados para prever a distribuição de temperatura em uma geome-

tria de feixes de barras com espaçadores helicoidais, característica de reatores LMFBR.

No Capítulo 2 faz-se uma breve definição do problema, abordando suas principais características físicas.

No Capítulo 3 é feita uma revisão da bibliografia. No item 3.1 são apresentados separadamente três modelos (códigos) de 4 equações, COBRA, THI-3D e COMMIX, e outros modelos simplificados de uma equação.

Ainda no Capítulo 3, item 3.2, apresenta-se uma revisão dos métodos experimentais empregados para medições dos principais parâmetros.

No Capítulo 4 são feitas algumas sugestões e comentários sobre o desenvolvimento do trabalho de pesquisa no setor.

## 2- COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

Os elementos combustíveis de reatores rápidos refrigerados a metal líquido, do tipo LMFBR, consistem em um feixe de barras de arranjo triangular com espaçadores helicoidais entre os quais escoia o fluido refrigerante (metal líquido-sódio). Na Fig. 2.1, mostra-se a secção reta de um conjunto combustível formado por 19 barras, cada uma com a respectiva helicoidal, mostrada em separado na Fig. 2.1. Esse conjunto de barras tem seu limite definido por um duto hexagonal conforme mostrado.

Para analisar essa geometria, é importante definir-se os subcanais no escoamento. Fig. 2.1 mostra os três tipos de subcanais normalmente utilizados.

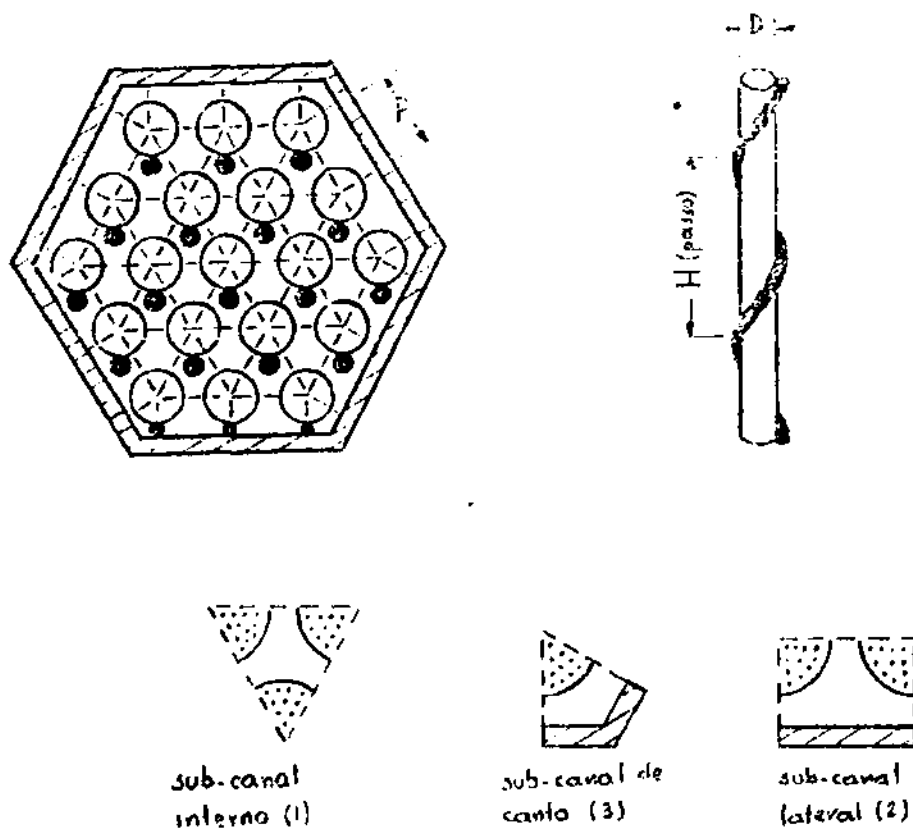


Fig. 2.1. Definição dos subcanais típicos e aspecto do arranjo de barras e da helicoidal



Sobre os volumes de controle formados por esses subcanais, serão aplicadas as equações de conservação do método de subcanais. Mesmo que não existam as helicoidais como espaçadores entre as barras, existe uma interconexão entre subcanais vizinhos que irá permitir uma troca de entalpia entre eles em virtude da ocorrência de misturas de fluido devido a existência de escoamentos secundários (transversais a direção principal, axial), devido a difusão turbulenta e à própria transferência de calor por condução.

Quando são colocadas as helicoidais no feixe de barras, o escoamento aumenta sua complexidade devido as bruscas variações da área de fluxo na direção axial, alterando profundamente a distribuição de pressão. Escoamentos transversais bem maiores surgem como um desvio da componente axial na direção da helicoidal, modificando a natureza dos mecanismos de misturas existentes.

Uma série de modelos de análise desses escoamentos transversais tem sido propostos nos últimos anos (isso será tratado mais adiante, no item 3.2.4). A redistribuição de energia em um feixe de barras com helicoidal possui os seguintes aspectos [2] [3] [4]:

- a) Condução térmica - este mecanismo é responsável pela transferência de energia por difusão molecular em fluidos de grande condutibilidade térmica.
- b) Transporte turbulento (mixing) - este mecanismo de transporte está associado com a ação da difusividade turbulenta, isto é, com o nível de turbulência molecular. Neste caso nenhum transporte líquido de fluido ocorre entre os subcanais.
- c) Escoamento disperso (scattering) - este mecanismo envolve uma mistura forçada não direcional induzidas por objetos tais como grades, que aumentam o nível de turbulência do fluido. Na maioria das vezes este transporte é incluído diretamente no 'mixing' turbulento acima.
- d) Escoamento transversal (cross-flow) - qualquer convecção do fluido devido a um gradiente de pressão

radial pode ser classificado como escoamento transversal. Neste caso existe um fluxo líquido não nulo entre os subcanais:

- i- escoamento transversal desviado (diversion) -  
- esta parcela do escoamento transversal total que ocorre entre os subcanais tem uma origem na não similaridade das características termohidráulicas locais;
- ii- escoamento transversal direcionado (sweep) -  
- para feixes de barras com arames helicoidais, o escoamento axial não possui uma trajetória vertical 'direta' no feixe, mas a intervalos regulares (depende do passo da helicoidal), o espaçador atravessa o espaço entre duas barras, e o escoamento é direcionado, parcialmente, de um subcanal para o vizinho devido a um gradiente de pressão favorável criado pelo espaçador. Este efeito direcional do arame helicoidal pode estender-se por uma pequena distância acima e abaixo da localização onde o arame atravessa o espaço entre as duas barras. Dessa forma, a quantidade de movimento axial do escoamento em um subcanal é periodicamente alterada pela presença do arame. A fração de quantidade de movimento axial carregada pelo escoamento direcionado transversalmente pode ser consideravelmente maior do que a fração carregada pelo escoamento transversal desviado, dependendo da relação  $H/D$ ;
- iii- escoamento transversal periférico (swirl) - os escoamentos direcionados nos subcanais laterais e de cantos tem características diferentes dos subcanais internos. Enquanto o escoamento direcionado em relação a um subcanal interno do feixe alterna sua direção periodicamente, o escoamento direcionado em relação a um subcanal da parede é sempre na mesma direção. Esta característica especial provoca a

existência de um escoamento líquido que gira em torno da parede interna do duto hexagonal. Este escoamento direcionado ao longo da região da parede foi denominado como escoamento transversal periférico (swirl).

Devido a presença dos espaçadores helicoidais, o principal mecanismo de mistura transversal é o escoamento direcionado, e este é variável com a posição axial em função do comportamento da helicoidal.

Fig. 2.2a mostra duas barras adjacentes, separadas pelos arames helicoidais. A vazão em massa do escoamento direcionado entre os subcanais  $i$  e  $j$  é expressa por  $w_{ij}$ , através do 'gap'. Como o arame 2 atravessa o 'gap' em  $x = x_1$ , ele transporta o fluido para fora do plano da página. Em  $x = x_2$ , o arame 1 transporta o escoamento através do 'gap' (o mesmo), na direção oposta. Em  $x = x_3$ , o escoamento através do 'gap' é novamente invertido, e assim por diante. Observando-se esse comportamento do escoamento, é de se esperar que a sua distribuição axial tenha a forma indicada na Fig. 2.2b. Admitindo-se que o máximo valor de  $w_{ij}$  corresponda a posição axial onde o arame cruza o espaço entre as barras.

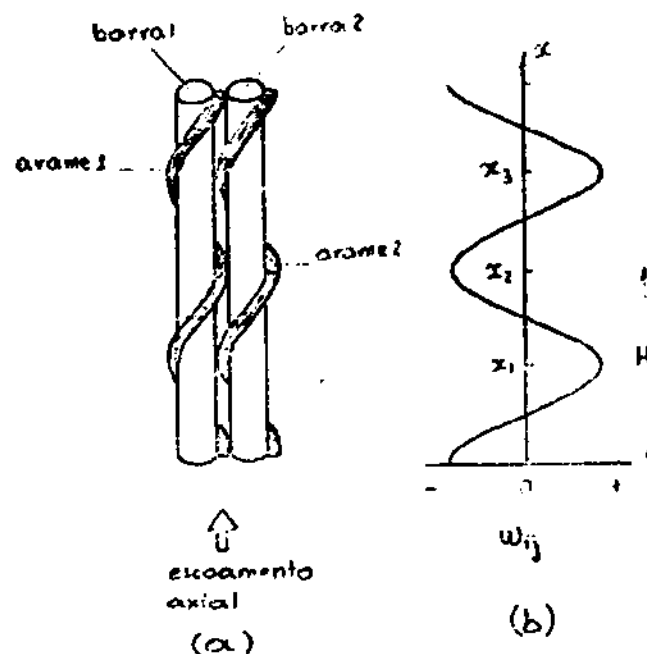


Fig. 2.2. Distribuição do escoamento transversal através do espaço entre as barras

Fig. 2.3 mostra uma secção reta do feixe de barras com a orientação dos arames helicoidais. Com uma rotação da posição do arame, em torno da superfície da barra de  $\theta = 60^\circ$  e um avanço da posição axial equivalente a  $H/6$ , o arame sai de um 'gap' para outro. Tomando-se a vazão máxima entre os subcanais, nestas posições axiais, pode-se construir um modelo de mistura baseado apenas em considerações geocêntricas do escoamento no feixe [3].

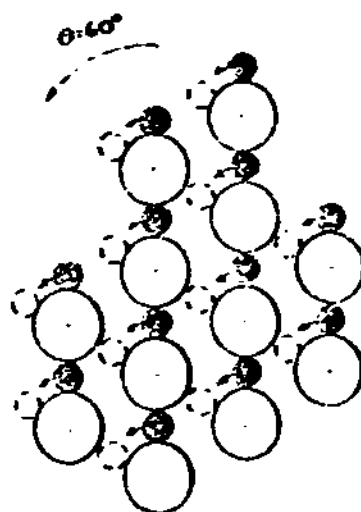


Fig. 2.3. Mudança da posição axial

Observa-se que, nos subcanais laterais, o espaço entre a barra e a parede só é atravessado por um arame helicoidal correspondente a essa barra e que cruza essa região sempre na mesma direção. Como consequência dessa propriedade, surge o escoamento periférico mostrado na Fig. 2.4.

Conforme será mostrado no Capítulo 3, o conhecimento das características desses escoamentos transversais é fundamental para a resolução das equações de conservação no feixe de barras, cujo objetivo é a determinação do campo do escoamento e da temperatura em todo feixe.

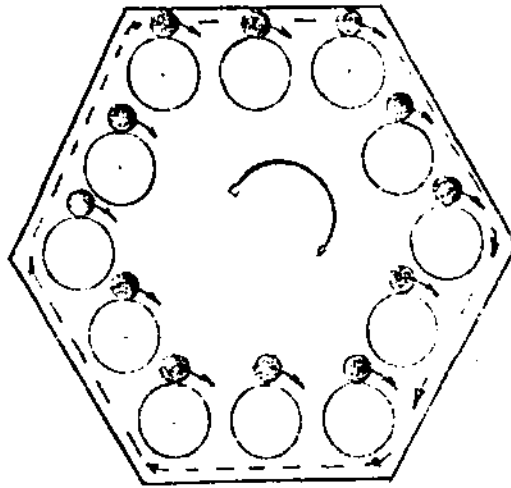


Fig. 2.4. Escoamento periférico ao longo da parede do duto

### 3- REVISÃO DA LITERATURA

Nesta revisão, os recentes esforços analíticos e experimentais, para caracterizar os campos do escoamento e temperatura do fluido refrigerante no interior de feixes de barras de elementos combustíveis de reatores do tipo LMFBR, são apresentados e é analisado o atual estado de conhecimento do setor. Foi realizado um esforço de correlacionar estes trabalhos num quadro coerente, a fim de caracterizar os futuros estudos analíticos e experimentais necessários ao desenvolvimento do conhecimento da área.

#### 3.1. Estudos Analíticos (códigos computacionais)

Tabela 1 apresenta um resumo dos principais códigos computacionais existentes para calcular a distribuição de entalpia do fluido refrigerante em feixes de barras com espaçadores helicoidais. Tais programas são analisados a seguir.

##### 3.1.1. COBRA III-C

O código COBRA III-C [5] é modelado através da divisão de uma seção reta do escoamento no feixe de barras em subcanais, conforme mostrado na Fig. 3.1, sendo desenvolvidas as equações de continuidade, quantidade de movimento e energia para cada subcanal. O método de subcanais é muito usado em análise termohidráulica de feixes de barras, assumindo explicitamente que uma das componentes da velocidade (direção axial) é predominante, comparada com as outras componentes (transversais). Isso trás uma vantagem tanto do ponto de vista físico como do computacional, pois pode-se tratar as equações de quantidade de movimento axial e transversal separadamente, permitindo simplificações na equação de quantidade de movimento transversal [1] [2].

Tabela 1. Códigos Computacionais para Feixes de Barras com Espaçadores Helicoidais

NOME	AUTOR	INSTITUIÇÃO	TIPO
COBRA III-C	Rowe	BNWL	Análise de subcanal 4 equações
THI-3D	Sha	ANL	Análise de subcanal 4 equações
COMMIX	Sha et al	ANL	Corpo poroso 4 equações
ENERGY	Khan et al	MIT	Corpo poroso 1 equação, 2 zonas
FULMIX	Magee	G.E.	Análise de subcanais 1 equação
ORRIBLE	Wantland	ORNL	Análise de subcanais 1 equação
COTEC	Novendstern	WARD	Análise de subcanais 1 equação
FORCMX	Graves e Catton	AI	Análise de subcanais 1 equação

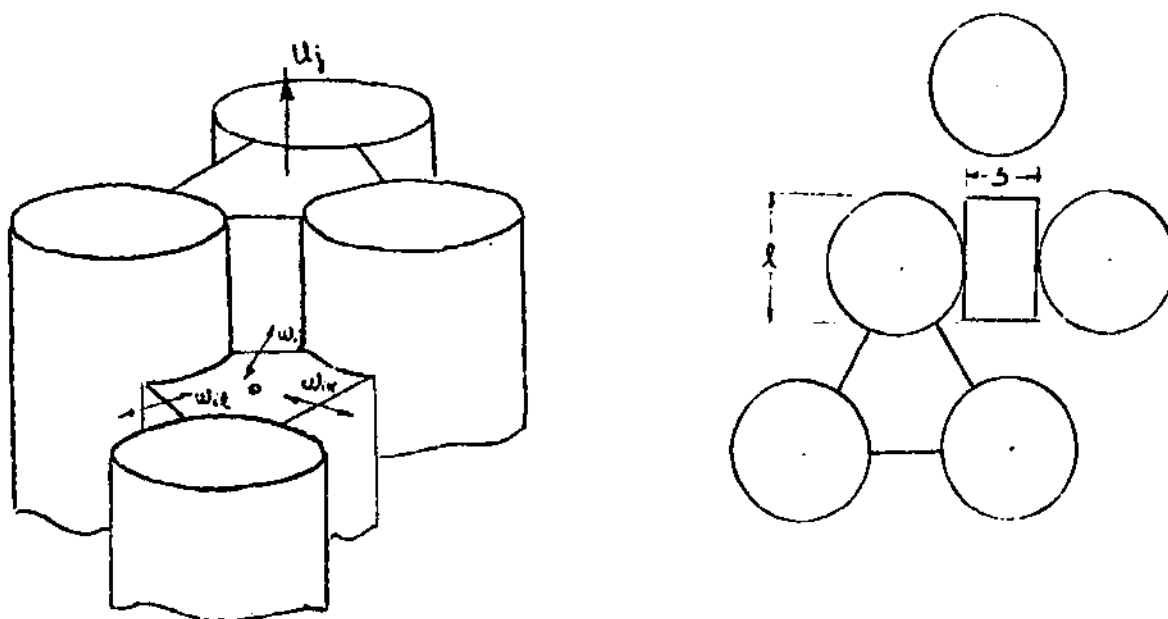


Fig. 3.1. Arranjo típico de subcanais

As equações da continuidade, da quantidade de movimento axial e transversal e a equação da energia são discretizadas para os nós dos volumes de controle mostrados na Fig. 3.1, e são resolvidas simultaneamente usando métodos numéricos.

São assumidos como conhecidos os seguintes parâmetros: a distribuição de pressão, a distribuição de entalpia e a distribuição de densidades na entrada e a pressão na saída. Para satisfazer a condição de pressão uniforme na saída, as velocidades na entrada dos subcanais são ajustadas.

O programa incorpora o transporte convectivo de entalpia devido ao escoamento transversal e devido a mistura turbulenta entre os subcanais adjacentes. Também são incluídos os efeitos de acelerações espaciais do escoamento transversal e os efeitos de perdas nesse mesmo escoamento. A área de um subcanal é considerada variável com a posição axial em função da posição da helicoidal. Como característica importante do código, suas sub-rotinas foram programadas para permitir o uso de um conjunto de correlações empíricas de preferência do usuário. Isto é fundamental, visto o grande número de códigos que possuem como base o sistema COBRA.

Como limitações básicas do COBRA III-C (ou de qualquer outro código com base em análise de subcanais, tais como o THI-3D (ANL), o FULMIX (G.E.), o ORRIBLE (ORNL) e o COTEC (WARD)), podem ser enumeradas as seguintes:

- a) trabalha-se com valores médios da velocidade e da temperatura no centro do subcanal (lumped parameter approach);
- b) a equação de quantidade de movimento transversal não pode ser tratada com o mesmo rigor como a equação de quantidade de movimento axial;
- c) para facilitar os cálculos, são necessários algumas aproximações das informações nas interfaces entre os volumes de controle das equações de quantidade de movimento axial e transversal.

O COBRA III-C, quando utilizado para calcular a distribuição de entalpia em um feixe completo de barras do núcleo de um reator LMFBR, requer tempo e espaço de armazenagem computacional excessivos. Este é um dos motivos para desenvolver-se



outros códigos computacionais baseados na análise de subcanais (item 3.1.3).

### 3.1.2. THI-3D

O código THI-3D [6], assim como o COBRA III-C, é baseado em análise de subcanal que se propõe a resolver o problema de valor no contorno. As condições de contorno conhecidas são a entalpia, a densidade e a pressão na entrada e a pressão na saída. A distribuição do escoamento, na entrada, é iterativamente calculada até que a distribuição de pressão, na saída, seja satisfeita.

O código usa um subcanal hexagonal em torno de cada barra (o subcanal triangular também pode ser usado). Como esta modificação reduz o número de canais, isto implica numa diminuição do tempo de computação.

Este código foi particularmente desenvolvido para analisar bloqueios parciais que podem ocorrer em qualquer lugar ao longo do feixe.

Assim como no COBRA III-C, o tempo de máquina é excessivamente longo. O tempo de execução [4] para um feixe de 217 barras, é em torno de 1 hr/iteração e, cada corrida, necessita mais ou menos de 4 iterações, o que é justificado pela natureza rigorosa do código, e o menor uso possível de resultados experimentais.

### 3.1.3. COMMIX-1

COMMIX é um código computacional que emprega um modelo de meio poroso. A estrutura de malha típica para um feixe de barras usada no código é mostrada na Fig. 3.2.

Um conjunto de equações básicas (continuidade, quantidade de movimento e energia) é desenvolvido para um volume de controle onde são distribuídos o meio fluido (do refrigerante) e corpos sólidos (feixe de barras e helicoidais) [7] [8]. Para isso, são definidas e incluídas nas equações a porosidade volumétrica, permeabilidade superficial, resistência distribuída e fontes de calor (ou sorvedouros) [7] [8].

O código é aplicável tanto a um meio contínuo (câmaras

plenas, tubulações, etc.) ou um meio quase contínuo (feixe de barras, conjunto combustível, gerador de vapor, etc.). Meio contínuo é definido onde todas as estruturas sólidas existentes são especificadas como contorno do domínio em estudo. Meio quase-contínuo é onde estruturas sólidas são encontradas no interior do domínio do fluido sem serem especificadas como contorno do domínio.

Um meio poroso pode ser facilmente reduzido a um contínuo, tomando-se a porosidade volumétrica e a permeabilidade superficial igual a unidade e a resistência distribuída como nula. Isto permite que o código seja usado para as duas classes de problemas.

Além desse fato anterior, outra vantagem do modelo, de meio poroso em relação ao método de análise de subcanal, é o fato de usar volumes de controle geometricamente similares e coordenadas ortogonais. Com isso as limitações (b) e (c) do método de subcanais são eliminadas, entretanto, o item (a) permanece também como limitação para análise de meio poroso.

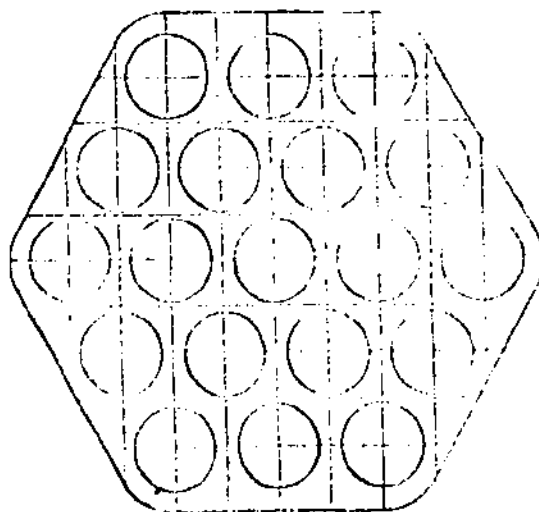


Fig. 3.2. Sub-divisão utilizada no COMIX

### 3.1.4. Modelos simplificados

Basicamente, o que estes outros códigos fazem é partir da estrutura do COBRA (modelo de análise de subcanais) e obter experimentalmente correlações experimentais (ou semi-empíricas) para a distribuição do escoamento, eliminando, assim, as equações de quantidade de movimento.

#### a) ENERGY [9] [10]

Este modelo, apesar de ser considerado como simplificado, difere dos outros modelos de análise de subcanais por duas razões. Primeiro, o feixe de barras é dividido em duas regiões predominantes: a região central e a região periférica (Figura 3.3). Segundo, ambas as regiões são tratadas como um contínuo, tomando-se o feixe de barras com helicoidais como um corpo poroso.

O modelo considera que a região I tem uma velocidade axial uniforme e a troca convectiva de entalpia é totalmente incorporada em um termo de mistura turbulenta entre as malhas da região I, considerando que em um passo da helicoidal o fluxo transversal líquido entre os subcanais é nulo (ver Fig. 2.2). Essa troca gera um parâmetro de difusão turbulenta ( $\epsilon$ ) que deve ser determinado experimentalmente. A região II tem uma velocidade axial uniforme e uma velocidade tangencial também uniforme (swirl flow). A geração de calor nas barras é representada por uma fonte de calor contínua.

A condição de contorno de união das duas equações requer que a temperatura e o fluxo de calor sejam contínuos através do contorno entre as duas regiões. A distribuição de temperatura na entrada deve ser dada.

As equações da energia, para as duas regiões, são escritas em diferenças finitas, sendo as malhas da região I formada por triângulos equiláteros e para a região II, por retângulos, conforme é mostrado na Fig. 3.3.

Os parâmetros de difusão turbulenta ( $\epsilon$ ) e distribuição de velocidades ( $c = v_{\theta}/u$ ) devem ser determinados experimentalmente.

Para determinar as diferenças de vazões entre as regiões I e II pode-se usar o método de Novendstern [11] de divi-

são do escoamento em subcanais, uma vez que a queda de pressão em todos os subcanais é a mesma [9].

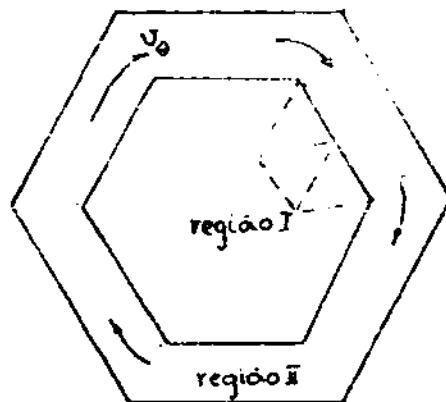


Fig. 3.3. Campo de escoamento nas duas regiões do ENERGY

O ENERGY-I (convecção forçada) requer 20 segundos do tempo computacional para determinar a temperatura do fluido em todas as posições axiais de um feixe de barras de um protótipo de LMFBR [9].

b) FORCMX [12]

O código foi desenvolvido pela Atomic International (AI) para incorporar um extenso volume de dados experimentais em um esquema computacional explícito. O código assume a área do subcanal inalterada pela presença da helicoidal, resultando em uma velocidade axial média constante para os canais internos. As velocidades, na vizinhança das paredes do duto hexagonal, são corrigidas (redistribuídas) usando-se um modelo de escoamento potencial. Esse modelo é ajustado pelos dados experimentais do perfil de velocidade axial no feixe, da componente lateral da velocidade próxima a parede e do gradiente axial de pressão.

Com esse campo de escoamento, a equação da energia é resolvida. Os resultados apresentam valores razoáveis para a distribuição de temperatura e uma grande economia de tempo e ar mazenagem computacional [12].

c) FULMIX [13] [14]

O código foi desenvolvido pela G.E., a partir do código GE-BRD, tendo sido incluído um modelo simples de escoamento

transversal. Este código, inicialmente, também considerava a área do subcanal inalterada em função da posição da helicoidal [13] e, conseqüentemente, a velocidade axial possui um valor constante. Uma nova versão do FULMIX [14] já utiliza a área variável com a posição e sofisticada a análise do escoamento transversal. Neste código um processo iterativo deve ser desenvolvido em cada posição axial para satisfazer a equação da continuidade e da energia.

d) ORRIBLE [15]

O código é usado para calcular a distribuição de temperatura e do escoamento em um feixe de barras com espaçadores helicoidais. Uma característica desse código é a eliminação da pressão na equação de quantidade de movimento axial, expressando-se o escoamento transversal desviado pelo espaço entre as barras (gap) como uma função da velocidade axial do canal adjacente. Esta relação é obtida assumindo que o escoamento desviado entre os canais é proporcional a raiz quadrada da diferença de pressão local entre os canais. A equação resultante expressa uma relação existente entre o escoamento transversal local e as velocidades axiais dos dois canais.

O escoamento transversal é modelado assumindo-se que é proporcional à velocidade axial do fluido no subcanal do qual o espaçador está saindo, sendo essa proporcionalidade definida pela inclinação da helicoidal.

A difusão turbulenta é admitida como uma mistura proporcional à soma das velocidades axiais dos dois canais adjacentes.

e) COTEC [16]

Este código, desenvolvido pela WARD, propõe um modelo de mistura de massa e entalpia entre os subcanais adjacentes para substituir a equação de quantidade de movimento na análise de subcanais. Dois dos fenômenos de transferência transversal, escoamento desviado e direcionado, são dependentes da posição relativa do espaçador helicoidal. Desses dois fenômenos resultam trocas líquidas de fluido e entalpia entre subcanais adjacentes. Nos outros dois fenômenos, mistura turbulenta e condução térmica de calor, somente existe troca líquida de entalpia

entre os subcanais adjacentes. Esses mecanismos foram discutidos no Capítulo 2. O código necessita de um processo de iteração transversal para satisfazer a continuidade.

### 3.2. Estudos Experimentais

Os métodos experimentais, normalmente empregados em testes de simulação do comportamento do fluido refrigerante das barras de combustíveis em reatores rápidos, utilizam como fluido de trabalho o sódio, a água ou o ar [17].

Experiência com sódio são extremamente caras e devem possuir um alto grau de confiabilidade. Estas são as principais vantagens da utilização da água ou do ar como fluidos de trabalho, pois as experiências possuem um menor grau de complexidade e são menos onerosas. Entretanto, como a condutibilidade térmica da água e do ar são muito diferentes da condutibilidade térmica do sódio, as medidas efetuadas com água e ar são usadas somente no estudo das características hidrodinâmicas do escoamento do sódio. Tais características hidrodinâmicas são expressas pelos seguintes parâmetros: pressão estática, tensão de cisalhamento, componente transversal do escoamento direcional devido a presença das helicoidais, distribuição da componente axial da velocidade e parâmetros de turbulência para determinação da mistura (mixing) entre canais. Estudos experimentais relacionados com parâmetros, tais como temperatura e número de Nusselt, devem ser realizados com sódio.

Os maiores esforços experimentais são realizados para simplificar os códigos computacionais. Isto é, os resultados obtidos de medidas das características hidrodinâmicas do escoamento são necessários como condições de entrada, nesses programas, para resolver a equação da energia, conforme foi analisado nos itens anteriores.

#### 3.2.1. Pressão estática

Os objetivos de obter-se experimentalmente a distribuição da pressão estática são:

- a) a determinação dos coeficientes de atrito, axial e transversal, dos diferentes subcanais e do coeficiente de atrito global resulta do conhecimento da distribuição da pressão estática;
- b) a distribuição da pressão estática axial, entre subcanais adjacentes, pode ser explorada para determinar-se um modelo para o escoamento transversal (ver capítulo 4 - sugestões).

Para o escoamento totalmente desenvolvido, mostra-se, experimentalmente [18] [19], que o comportamento do escoamento é repetitivo em um passo da helicoidal.

A queda de pressão (perda de carga) na direção axial é medida em uma série de trabalhos, conforme relação na Tabela 3.2. Em alguns desses trabalhos, foi obtido o gradiente de pressão estática situados ao longo do escoamento em posições equivalentes, com relação as helicoidais. Em outros, o gradiente é obtido por apenas duas tomadas: entrada e saída.

As distribuições de pressão, axial e transversal, na face do duto hexagonal, foram medidas em [18] e [19].

Fernandez e Carajilescov [18] e Arwikav [20] apresentam resultados da distribuição de pressão estática na superfície das barras. É interessante notar que as distribuições de todas essas pressões, quando adimensionalizadas na forma do número de Euler, apresentam um comportamento independente no número de Reynolds global do feixe.

Tabela 3.2. Métodos e Experiências para o obtenção da Queda de Pressão em Feixes de Barras com Espaçadores Helicoidais

Autor	Refer	Inst.	Número Barras	P/D	H/D	Meio	Faixa de $Re$ ( $10^{-3}$ )
SANGSTER	[21]	GE	modelo semi-empírico			-	4,0 - 100,0
NOVENDSTERN	[11]	WARD	modelo semi-empírico			-	2,6 - 200,0
CARAJILESCOV	[22]	PUC/RJ	modelo semi-empírico			-	1,0 - 100,0
BALLVE	[23]	PUC/RJ	7	1,20	15,0	Ar	4,0 - 50,0
CHIU	[24]	MIT	61	1,067	4,0 e 8,0	Água	0,197 - 16,6
REHME	[25]	INR	7-61	1,125-1,417	6,0-45,0	Água	1,0 - 300,0
BISHOP	[26]	UP	19	1,205	8,0-24,0	Água	10,0 - 100,0

### 3.2.2. Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento na superfície das barras ( $\tau_0$ ), que está relacionada com o gradiente de pressão, pode ser usada em modelos de perfis universais de velocidade (lei da parede), com modelos de difusividade turbulenta [26] e com analogias de quantidade de movimento e transferência de calor para determinação do coeficiente de troca de calor convectivo local [27].

O primeiro esforço experimental da determinação da tensão de cisalhamento na superfície das barras em feixe de arranjo triangular com espaçadores helicoidais foi feito por Fernandez [28], utilizando a técnica do tubo de Preston.

Chiu et al [17] apresenta uma lista de técnicas de medidas de tensão de cisalhamento em feixe de barras, comentários sobre vantagens e desvantagens, processo de calibração e análise de erro.

### 3.2.3. Velocidade axial do subcanal

Normalmente, a distribuição de velocidade axial pelos subcanais é feita através do modelo semi-empírico de Novendstern [11], baseado na hipótese de que a perda de carga em todos os subcanais é a mesma, em considerações geométricas e que o coeficiente de atrito em cada subcanal é dado por  $f_i = c \cdot Re_i^m$ . Esses coeficientes são determinados a partir de dados experimentais do gradiente de pressão axial. Desta forma, determina-se a distribuição do escoamento para que essas condições sejam obedecidas.

Um método experimental, para medir a distribuição da velocidade axial nos subcanais, é o chamado de método isocinético, apresentado por Chiu et al [29].

O critério para o escoamento isocinético (idêntico a hipótese de Novendstern) é que a pressão estática na saída do subcanal medido é igual a pressão estática em toda a vizinhança. Esse critério assegura que a pressão estática e, por isso, a vazão em massa coletada na saída do subcanal medido não foram perturbadas pela instalação do instrumento de medida.

Com isso, obtém-se a distribuição de escoamento entre os subcanais internos e os laterais. Os resultados encontram-se na referência [29].



Carajilescov [28] e Chiu [29] também apresentam modelos semi-empíricos para a distribuição do escoamento, onde são comparados os três métodos e os resultados experimentais.

#### 3.2.4. Escoamento transversal

A velocidade transversal, induzida pelos espaçadores helicoidais, é fundamental para o processo de mistura entre subcanais do feixe. Os diferentes tipos de escoamentos transversais, identificados por Rogers e Todreas [2], como o escoamento direcionado e outros, podem ser vistos como um termo de grande difusividade turbulenta de quantidade de movimento [9] [10], os quais trocam uma quantidade nula de fluido entre os subcanais adjacentes em um passo da helicoidal.

Para quantificar esses processos de mistura em separado, para cada posição axial, ou, em geral, um parâmetro de velocidade transversal integrado, medidas diretas da velocidade ou experiências com traçadores (tracer experiments) de sal, ou outras, são realizadas.

A medida direta da velocidade pode ser feita utilizando-se tubo de Pitot (ou COBRA) [17]; LDA (Laser Doppler Anemometer) [30], traçadores de sal ou aquecimento [17] [19] [31] [32].

Observando-se esses resultados, pode-se enumerar algumas características importantes desse escoamento:

- a) tanto o comportamento da velocidade axial como da transversal são cíclicos;
- b) quando a média, sobre um passo da helicoidal, da troca transversal entre dois subcanais interiores é obtida, ela resulta muito pequena (= nula);
- c) em contraste, o escoamento transversal na região periférica é unidirecional, resultando um valor não desprezível quando toma-se a média em um passo da helicoidal;
- d) existe um grande fluxo transversal por baixo do espaçador quando este atravessa o 'gap'.

Essas informações experimentais da distribuição do escoamento no feixe de barras são fundamentais para o desenvolvimento de modelos semi-empíricos e geométricos que determinam as velocidades axiais e transversais nos subcanais, de acordo com

o fluxo de massa total no feixe e das razões de aspecto  $p/D$  e  $H/D$ . Tais propostas de modelos de distribuição do escoamento podem ser encontradas nas referências [2] [11] [22] [29] [31] [33] e [34].

### 3.2.5. Temperatura

Medidas da temperatura do fluido refrigerante, no interior de feixe de barras com espaçadores helicoidais, devem ser realizadas utilizando sódio como fluido de trabalho. Os problemas técnicos envolvidos na instalação dos termopares são algumas das dificuldades envolvidas nesse aparato experimental com sódio.

Fontana [35] apresenta resultados da distribuição de temperatura na face do duto hexagonal para um feixe de 19 barras. São dadas as distribuições de temperatura transversal e axial. Fontana [36] mostra resultados experimentais da distribuição de temperatura nos subcanais periféricos. Neste trabalho, são comparadas as temperaturas obtidas experimentalmente e aquelas previstas pelo código ORRIBLE [15].

#### 4- COMENTÁRIOS E SUGESTÕES

A preparação de códigos computacionais, para determinação da distribuição de temperatura em feixes de barras para reatores LMFBR, com modelos de uma equação, visam simplificar códigos do tipo COBRA, que necessitam de grande espaço de memória e tempo de máquina excessivamente longo.

A simplificação do molode passa necessariamente pela substituição da equação de quantidade de movimento por expressões da distribuição do escoamento no feixe, que precisam ser determinadas com base em resultados experimentais. Para que essas expressões representem de forma geral a distribuição do escoamento, um número grande de experiências devem ser realizadas. A distribuição de velocidades depende diretamente dos seguintes parâmetros:  $N$ ,  $P/D$ ,  $H/D$ ,  $Re$ .

Os resultados experimentais, apresentados no item 3.2, ainda não são suficientes para garantir-se a universalidade dos modelos semi-empíricos adotados, pois as faixas de variações desses quatro parâmetros ainda são razoavelmente limitadas.

Propõem-se, como desenvolvimento do estágio atual, gerar um código de uma equação para determinação da distribuição de temperatura em feixes de barras com espaçadores helicoidais, baseado na formulação de novas expressões da distribuição do escoamento através do desenvolvimento de modelos semi-empíricos com maior generalidade.

No método de 4 equações, os parâmetros não conhecidos são: pressão ( $p$ ), componente axial da velocidade ( $u$ ), componente transversal da velocidade ( $v$ ) e temperatura ( $T$ ). As equações de conservação devem ser resolvidas simultaneamente por um processo iterativo. No entanto, se for possível obter-se expressões para a distribuição da pressão ou da velocidade, as equações podem ser resolvidas separadamente.

Resultados experimentais da distribuição de pressão, no feixe [18] [23], mostram que, quando devidamente adimensionalizados, o seu comportamento é independente do número de Reynolds e que as curvas da pressão, em função da posição axial, tem um comportamento muito semelhante ao comportamento da distribuição do escoamento transversal mostrado na Fig. 2.2b. Pretende-se, então, relacionar, através da equação da quantidade de movimento transversal, a diferença de pressão entre dois subcanais ad-

adjacentes com a vazão no 'gap' entre esses subcanais. A construção desse modelo é um dos objetivos do projeto sendo desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica - PUC/RJ.

Lemos [37] mediu a distribuição de velocidade (axial e transversal) para o escoamento num canal anular com helicoidal. Através da composição desses resultados, em um feixe de barras, conforme mostra a Fig. 4.1, pode-se determinar diretamente o escoamento direcionado nas fronteiras dos subcanais. Este corresponderia ao segundo modelo de solução.

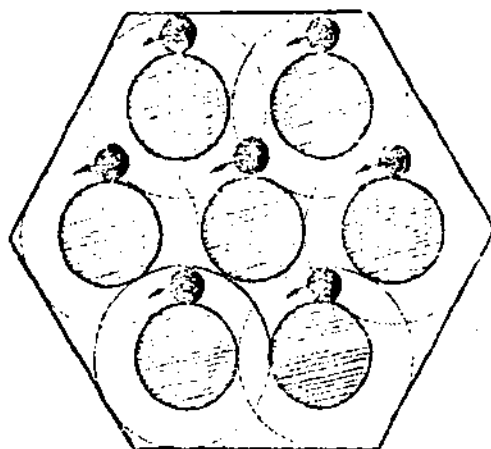


Fig. 4.1. Modelo de superposição dos canais anulares em feixes de barras

Para verificar a validade dos resultados obtidos por esses dois modelos e em que condições eles podem ser adequadamente aplicados, pretende-se medir o campo do escoamento em um feixe de barras com espaçadores helicoidais.

Como consequência, uma série de medidas experimentais devem ser obtidas, para garantir uma maior universalização dos métodos, correção de coeficientes, calibração de instrumentação, etc.

Uma dessas medidas, que deve ser exaustivamente pesquisada, é a distribuição da pressão estática em função do número de Reynolds e das razões de aspecto  $P/D$  e  $H/D$ .

Para correlacionar a temperatura do refrigerante com a temperatura da superfície da barra precisa-se do número de Nusselt local. Nenhuma das referências pesquisadas apresenta

esse resultado para um feixe de barras com espaçador helicoidal refrigerado a metal líquido. Esforços estão sendo feitos no intuito de se obter uma analogia entre transferência de calor e transferência de quantidade de movimento na parede. Neste caso, com informações sobre a lei da parede para equação da energia e valores do coeficiente de atrito local (que podem ser obtidos experimentalmente através da tensão de cisalhamento local), determina-se a distribuição do número de Nusselt.

#### Próximas Etapas do Projeto

- 1- Distribuição da pressão estática em feixe de barras com helicoidal em função de  $Re$ ,  $N$ ,  $P/D$ ,  $H/D$ ;
- 2- Determinação do coeficiente de perda de carga transversal no feixe, entre dois subcanais;
- 3- Modelo de distribuição do escoamento baseado nas distribuições de pressão radial e axial;
- 4- Modelo de distribuição do escoamento baseado na composição dos escoamentos anulares com helicoidal;
- 5- Medição do campo de velocidades em um feixe de sete barras com helicoidal em ar;
- 6- Preparação de código computacional para obtenção da distribuição de entalpia em feixes de barras com helicoidal;
- 7- Medição do campo de temperaturas em feixe de barras com helicoidal, usando água;
- 8- Calibração do tubo de Preston para o escoamento anular e obtenção da lei da parede, nestas condições;
- 9- Medição da distribuição de tensão de cisalhamento na parede das barras, componentes axial e transversal, para utilização da analogia;
- 10- Obtenção de uma analogia entre transferência de calor e quantidade de movimento para determinação do número de Nusselt local.

REFERÊNCIAS

- [ 1 ] BRASIL - "O Programa Nuclear Brasileiro", República Federativa do Brasil, Março de 1977.
- [ 2 ] Rogers, J.T. e Todreas, N.E. - "Coolant Interchannel Mixing in Reactor Fuel Rod Bundles Single-Phase Coolants", ASME, Winter Meeting (1968).
- [ 3 ] Ginsberg, T. - "Forced-Flow Interchannel Mixing Model for Fuel Rod Assemblies Utilizing a Helical Wire-Wrap Spacer System", Nucl. Eng. and Design, Vol. 22 (1972).
- [ 4 ] Khan, E. and Todreas, N.E. - "A Review of Recent Analytical and Experimental Studies Applicable to LMFBR Fuel and Blanket Assembly Design", MIT-COO-2245-4 (1973).
- [ 5 ] Rowe, D.S. - "COBRA III-C: A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements", BNWL-1965, (1973).
- [ 6 ] Sha, W.T., Schmitt, R.C. and Huebotter, P.R. - "Boundary-Value Thermal-Hydraulic Analysis of a Reactor Fuel Rod Bundle", Nucl. Eng. and Design, Vol. 59 (1976).
- [ 7 ] Sha, W.T. - "An Overview on Rod-Bundle Thermal-Hydraulic Analysis", Nucl. Eng. and Design, Vol. 62 (1980).
- [ 8 ] Sha, W.T. et al - "A New Approach for Rod-Bundle Thermal-Hydraulic Analysis", Nucl. Technology, Vol. 46 (1979).
- [ 9 ] Khan, E.U. et al - "A Porous Body Model for Predicting Temperature Distribution in Wire Wrapped Fuel and Blanket Assemblies of a LMFBR", MIT-COO-2245-16TR (1975).
- [ 10 ] Khan, E.U. et al - "Simplified Approach for Predicting Temperature Distribution in Wire Wrapped Assemblies", MIT-COO-2245-5 (1973).
- [ 11 ] Novendstern, E.H. - "Turbulent Flow Pressure Drop Model for Fuel Rod Assemblies Utilizing a Helical Wire-Wrap Spacer System", Nucl. Eng. and Design, Vol. 22 (1972).
- [ 12 ] Graves, A.W. and Catton, I. - "An Explicit Method for Predicting the Thermal Performance of FBR Wire-Wrapped

- Fuel Rod Assemblies", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 15.1, pp. 404 (1972).
- [13] Magee, P.M. - "Modeling of Flow Sweeping Effects in Wire-Wrapped Rod Bundles", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 15.1, pp. 406 (1972).
- [14] Wei, J.P. - "Prediction of Coolant Mixing and Peripheral Flow in Wire-Wrapped Rod Bundles", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 33, pp. 953 (1979).
- [15] Wantland, J.L. - "ORRIBLE - A Computer Program for Flow and Temperature Distribution in LMFBR Rod Bundles", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 15.1, pp. 407 (1972).
- [16] Novendstern, E.H. - "Mixing Model for Wire-Wrap Fuel Assemblies", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 15.2, pp. 866, (1972).
- [17] Chiu, C., Todreas, N.E. and Morris, R. - "Experimental Techniques for Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactor Fuel Assembly Thermal-Hydraulic Tests", Nucl. Eng. and Design, Vol. 62 (1980).
- [18] Fernandez, E.F. e Carajilescov, P. - "Estudo Experimental da Distribuição da Pressão Estática e da Queda de Pressão Axial em um Feixe de Sete Barras com Espaçadores Helicoidais", PUC/RJ, RI-DEM-02/80, (1980).
- [19] Lafay, J., Menant, B. e Barroil, J. - "Local Pressure Measurements and Peripheral Flow Visualization in a Water 19-Rod Bundle Compared with FLICA II B Calculations: Influence of Helical Wire-Wrap Spacer System", ASME paper 75-HT-22 (1975).
- [20] Arwika, K. and Fenech, H. - "Heat Transfer, Momentum Losses and Flow Mixing in a 61-Tube Bundle with Wire-Wrap", Nucl. Eng. and Design, Vol. 55 (1979).
- [21] Sangster, W.A. - "Calculation of Rod Bundle Pressure Loss", ASME paper 68-WA/HT-35 (1968).
- [22] Carajilescov, P. e Fernandez, E.F. - "Modelo Semi-Empírico para o Cálculo do Coeficiente de Atrito em Feixes de Barras com Espaçadores Helicoidais", PUC/RJ, RI-DEM-05/81.

- [23] Ballve, H., Coitinho, M., Fernandez, E.F., Carajilescov, P. - "Medidas da Pressão Estática Periférica e da Queda de Pressão em um Feixe de Barras de Arranjo Triangular com Espaçadores Helicoidais", PUC/RJ, RI-DEM-04/81 (1981).
- [24] Chiu, C., Todreas, N.E., Rohsenow, W. - "Pressure Drop Measurements in LMFBR Wire-Wrapped Blanket Bundles", Trans. Am.Nucl. Soc., Vol. 33, pp. 541, (1979).
- [25] Rehme, K.- "Pressure Drop Correlations for Fuel Element Spacers", Nucl. Technology, Vol. 17 (1973).
- [26] Nijssing, R. - "Heat Exchange and Heat Exchangers with Liquid Metals", AGARD-LS-57-72 (1972).
- [27] Berthoud, J.S. - "Análise Térmica de Escoamentos Axiais em um Subcanal Típico de Elementos Combustíveis Nucleares", PUC/RJ, DEM, Tese de Mestrado (1979).
- [28] Fernandez, E.F. - "Estudo Experimental das Distribuições da Pressão Estática e da Tensão de Cisalhamento Superficial em um Feixe de Sete Barras com Espaçadores Helicoidais", PUC/RJ, DEM, Tese de Mestrado (1978).
- [29] Chiu, C. Todreas, N.E., Rohsenow, W. - "Turbulent Flow Split Model and Supporting Experiments for Wire-Wrapped Core Assemblies", Nucl. Technology, Vol. 50 (1980).
- [30] Wheellev, C.L., Rowe, D.S., Smith, J.D. - "An Experimental Study of Axial and Crossflow Velocity in a 7-Pin Wire-Wrapped Bundle", BNWL-1804 (1974).
- [31] Collinghanm, R.E., Thone, W.L., McCormack, J.D. - "Coolant Mixing in a Fuel Pin Assembly Utilizing Helical Wire-Wrap Spacers", Nucl. Eng. and Design, Vol. 24 (1973).
- [32] van Erp, J.B., Chawla, T.C. - "Experimental Evaluatuon of Subchannel Coolant Cross flow in LMFBR Subassemblies with Wire-Wrap Spacers", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 15.2, (1972).
- [33] Bishop, A.A., Todreas, N.E. - "Hydraulic Characteristics of Wire-Wrapped Rod Bundles", Nucl. Eng. and Design, Vol. 62 (1980).



- [34] Todreas, N.E. Turi, J. - "Interchannel Mixing in Wire-Wrapped Liquid Metal Fast Reactor Fuel Assemblies", Nucl. Technology, Vol. 13 (1972).
- [35] Fontana, M.H. et al - "Temperature Distribution in the Duct Wall of a 19-Rod Simulated LMFBR Fuel Assembly", Trans. Am. Nucl. Soc., V-1. 15.1, pp. 409 (1972).
- [36] Fontana, M.H. et al - "Edge-channel Flow in a 19-Rod LMFBR Fuel Assembly", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 15.2, pp.855 (1972).
- [37] Lemos, M.J.S. - "Análise Experimental do Campo de Velocidades em Canal Anular com Helicoidal", PUC/RJ, DEM, Tese de Mestrado, (1979).