ESTUDO EXPERIMENTAL DAS DISTRIBUIÇÕES DA PRESSÃO
ESTÁTICA E DA TENSÃO CISALHANTE SUPERFICIAL EM UM
FEIXE DE SETE BARRAS COM ESPAÇADORES HELICOIDAIS

ELOI FERNANDEZ Y FERNANDEZ

Agosto de 1978

ELOI FERNANDEZ Y FERNANDEZ

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS DISTRIBUIÇÕES DA PRESSÃO
ESTÁTICA E DA TENSÃO CISALHANTE SUPERFICIAL EM UM
FEIXE DE SETE BARRAS COM ESPAÇADORES HELICOIDAIS

Tese apresentada ao Departamento
de Engenharia Mecânica da PUC/RJ
como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Pedro Carajilescov

Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, 5 de agosto de 1978

para Eliane

Meus agradecimentos aos mestres e companheiros

Ao Prof. Pedro Carajilescov, pela indispensável orientação.

Ao Prof. Philemon M. Cunha, a quem devo sugestões e o questionamento crítico.

Ao Prof. Sidney Stuckembruck, pelo entusiasmo e o apoio.

Ao Eng. Juarez Garcia, pelas discussões na elaboração do projeto do aparato.

Aos Laboratoristas Lourenço Ribeiro e Jandir da Cunha Neto, pelas colaborações dadas.

Aos Operários Ademar Monteiro dos Anjos, José Raimundo Martins, Edson Amorim, Antonio de Oliveira, Paulo Sergio de Farias e Marcílio, que deram valiosas opiniões na construção do aparato.

Ao monitor Francisco Buarque, pela colaboração nos desenhos.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento recebido durante o curso.

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS DISTRIBUIÇÕES DA PRESSÃO ESTÁTICA
E DA TENSÃO CISALHANTE SUPERFICIAL EM UM FEIXE DE SETE BARRAS
COM ESPAÇADORES HELICOIDAIS

por

ELOI FERNANDEZ Y FERNANDEZ

SUMÁRIO

O elemento combustível de um reator do tipo LMFBR consiste em um feixe de barras de arranjo triangular com espaçadores helicoidais entre os quais é bombeado o refrigerante. Neste trabalho, utilizando-se de tal elemento combustível composto de sete barras com espaçadores helicoidais acoplado a um circuito de ar foi simulado o comportamento hidrodinâmico do escoamento. Uma série de medidas foram efetuadas para se obter as distribuições da pressão estática e da tensão cisalhante na superfície das barras, para diferentes números de Reynolds, variando-se a posição axial e angular, em um passo da helicoidal.

Dos resultados obtidos, observou-se a existência de zonas de baixa pressão na superfície das barras, assim como a não dependência da tensão cisalhante adimensionalizada pela tensão média em função do número de Reynolds. Observou-se, ainda, variações bruscas na distribuição da pressão estática e da tensão cisalhante, que devem ser levadas em consideração no projeto termo-hidráulico devido a possibilidade de ocorrência de bolhas de cavitação no refrigerante.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STATIC PRESSURE AND THE WALL
SHEAR STRESS DISTRIBUTIONS IN A SEVEN-ROD BUNDLE WITH
HELICAL WIRE WRAP SPACERS.

by

ELOI FERNANDEZ Y FERNANDEZ

ABSTRACT

The fuel element of a LMFBR reactor consists of a wire wrapped rod bundle with triangular array with the coolant flowing in the space between the rods. In this work, using this type of element with seven rods connected to an air open loop, it was simulated the hydrodynamic behavior of the flow. Several measurements were performed in order to obtain the static pressure and the rods wall shear stress distributions, for different Reynolds numbers and different axial and angular positions in a wire wrap lead.

From the obtained results, it was observed the existence of low pressure zones on the surface of the rods, as well as the non-dependency on the Reynolds number of the wall shear stress distribution non-dimensionalized by its average value. Yet, it was observed abrupt variations in the static pressure and wall shear stress distributions which should be taken into account in the thermalhydraulic design due to the possibility of occurrence of cavitation bubbles in the coolant.

ÍNDICE

NOMENCLATURA	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	xii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA	3
CAPÍTULO III - APARATO EXPERIMENTAL	
III.1 - Circuito de Ar	7
III.2 - Seção de Teste	8
III.3 - Instrumentação	10
CAPÍTULO IV - RESULTADOS	
IV.1 - Desenvolvimento do Escoamento	23
IV.2 - Coeficiente de Atrito	24
IV.3 - Distribuição da Pressão Está-	
tica nas Paredes do Duto	28
IV.4 - Distribuição da Tensão Cisa-	
lhante e da Pressão Estática	
na Superfície das Barras	28
CAPÍTULO V - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	67
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICES	
A - Dados Experimentais	73
B - Tubo de Preston	98
C - Desenhos relativos ao Projeto e Construção	
do Aparato	101

NOMENCLATURA

- A_i - arame da barra i
- A_o - área de fluxo na tubulação de alimentação
- A_f - área de fluxo na seção de teste
- A_{fi} - área de fluxo do sub-canal i
- a - diâmetro do tubo de Preston
- B_i - barra i
- d - diâmetro das barras
- d_h - diâmetro hidráulico
- d_{hi} - diâmetro hidráulico do sub-canal i
- f - coeficiente de atrito
- f_b - coeficiente de atrito de Blasius
- h - distância transversal na face do duto hexagonal
- ℓ - passo das helicoidais
- ℓ/d - razão do passo
- M - fator para correção do coeficiente de atrito
- n_i - número de sub-canaís do tipo i , na seção de teste
- p - distância entre centros das barras ou pressão estática local (a diferenciação é observada no contexto)
- $\bar{p}$ - pressão média em uma seção da seção de teste
- P_m - perímetro molhado
- p_θ - pressão da câmara plena
- p/d - razão dos centros
- Q - vazão
- Re - número de Reynolds na seção de teste
- Re_l - número de Reynolds no sub-canal triangular
- T - temperatura do fluido

- u - velocidade local na seção de teste - $u(y)$
- $\bar{u}$ - velocidade média na seção de teste
- $\bar{u}_l$ - velocidade média no sub-canal triangular
- u^* - velocidade de atrito local
- V - velocidade no tubo de alimentação - $V(y)$
- $\bar{V}$ - velocidade média no tubo de alimentação
- W - vazão em massa
- W_l - vazão em massa no sub-canal triangular
- x - coordenada axial
- χ - fator de distribuição do escoamento nos sub-canais
- $\bar{y}$ - coordenada normal à superfície interna
- Y - fator para correção do coeficiente de atrito, pelo método XYZ
- Z - fator para correção do coeficiente de atrito, pelo método XYZ
- α - ângulo que define a posição das barras
- θ - ângulo de medida do posicionamento do trecho independente da barra de teste
- ν - viscosidade cinemática do fluido
- μ - viscosidade do fluido
- ρ - densidade do fluido
- τ_o - tensão cisalhante local - $\tau_o = \tau_o(\alpha, \theta)$
- $\bar{\tau}_o$ - tensão cisalhante média - $\bar{\tau}_o = \bar{\tau}_o(\alpha)$

LISTA DE FIGURAS

Figura III.1	- Vista geral do aparato	13
Figura III.2a	- Distribuição das sete barras com os arames helicoidais	14
Figura III.2b	- Vista longitudinal de uma barra	14
Figura III.3	- Secção reta do conjunto da secção de teste	15
Figura III.4	- Representação da "mudança aparente" de posição axial, através da rota- ção conjunta das barras	16
Figura III.5	- Distribuição das tomadas de pressão estática ao longo da direcção axial	17
Figura III.6	- Distribuição das tomadas de pressão estática na direcção transversal, so- bre uma das faces do duto hexagonal	18
Figura III.7	- Montagem do tubo de Preston	19
Figura III.8	- Mecanismo de posicionamento do tubo de Pitot	20
Figura III.9	- Curva de calibração do tubo de Preston	21
Figura III.10	- Curva de calibração do tubo de Pitot	22
Figura IV.1	- Queda de pressão estática (Δp_{xx}), Re = 33000	30
Figura IV.2	- Queda de pressão estática (Δp_{xx}), Re = 49000	31

Figura IV.3	- Queda de pressão estática ($\Delta p \times x$), Re = 71000	32
Figura IV.4	- Queda de pressão estática ($\Delta p \times x$), Re = 77000	33
Figura IV.5	- Coeficiente de atrito em função do número de Reynolds	34
Figura IV.6	- Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal, $\alpha = 0^\circ$	35
Figura IV.7	- Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal, $\alpha = 60^\circ$	36
Figura IV.8	- Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal, $\alpha = 120^\circ$	37
Figura IV.9	- Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal, $\alpha = 180^\circ$	38
Figura IV.10	- Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal, $\alpha = 240^\circ$	39
Figura IV.11	- Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal, $\alpha = 300^\circ$	40
Figura IV.12	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 0^\circ$	41
Figura IV.13	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 60^\circ$	42
Figura IV.14	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 120^\circ$	43

Figura	IV.15	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 180^\circ$	44
Figura	IV.16	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ ; $\alpha = 240^\circ$	45
Figura	IV.17	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ ; $\alpha = 300^\circ$	46
Figura	IV.18	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 0^\circ$	47
Figura	IV.19	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 60^\circ$	48
Figura	IV.20	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 120^\circ$	49
Figura	IV.21	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 180^\circ$	50
Figura	IV.22	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 240^\circ$	51
Figura	IV.23	- Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 300^\circ$	52

Figura	IV.24	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 0^\circ$	53
Figura	IV.25	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 60^\circ$	54
Figura	IV.26	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 120^\circ$	55
Figura	IV.27	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 180^\circ$	56
Figura	IV.28	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 240^\circ$	57
Figura	IV.29	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 300^\circ$	58
Figura	IV.30	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 0^\circ$	59
Figura	IV.31	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 60^\circ$	60
Figura	IV.32	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 120^\circ$	61

Figura	IV.33	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 180^\circ$	62
Figura	IV.34	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 240^\circ$	63
Figura	IV.35	- Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 300^\circ$	64
Figura	IV.36	- Determinação da incerteza para a tensão cisalhante adimensionalizada, para $Re = 77000$, $\alpha = 0^\circ$ e barra periférica	65
Figura	IV.37	- Determinação da incerteza para a tensão cisalhante adimensionalizada, para $Re = 33000$, $\alpha = 0^\circ$ e barra periférica.	66
Figura	V.1	- Zona de baixa pressão	68
Figura	C.1	- Câmara plena	101
Figura	C.2	- Suporte de sustentação das barras da seção de teste	102
Figura	C.2a	- Suporte de sustentação das barras da seção de teste, detalhes e solda	103
Figura	C.3	- Montagem de uma das barras simples	104
Figura	C.4	- Composição da barra de teste	105
Figura	C.5	- Montagem do duto hexagonal da seção de teste	106
Figura	C.5a	- Montagem do duto hexagonal da seção de teste	107

Figura	C.6	- Comutador de pressão	108
Figura	C.6a	- Comutador de pressão	109
Figura	C.7	- Transferidor para medida do ângulo α	110
Figura	C.8	- Tubo de Pitot	111
Figura	C.9	- Sistema de posicionamento do tubo de Pitot	112
Figura	C.10	- Montagem do tubo de Preston	113
Figura	B.1	- Calibração do tubo de Preston, curva retirada da referência 13	100

LISTA DE TABELAS

Tabela	II.1	- Tabela resumindo os trabalhos comenta dos neste capítulo	6
Tabela	III.1	- Dados do Ventilador	7
Tabela	III.2	- Manômetros utilizados	12
Tabela	IV.1	- Diâmetros hidráulicos dos sub-canais	25
Tabela	IV.2	- Comparação entre os coeficientes de atrito obtidos por trabalhos diferen tes	27
Tabela	A.1	- Perfil de velocidade no tubo de ali- mentação	74
Tabela	A.2	- Parâmetros associados com as corri- das efetuadas	75
Tabela	A.3	- Queda de pressão ao longo da direção axial, corrida I: $Re = 33000$	76
Tabela	A.4	- Queda de pressão ao longo da direção axial, corrida II: $Re = 49000$	77
Tabela	A.5	- Queda de pressão ao longo da direção axial, corrida III: $Re = 71000$	78
Tabela	A.6	- Queda de pressão ao longo da direção axial, corrida IV: $Re = 77000$	79
Tabela	A.7	- Pressão estática na face A do duto hexagonal	80
Tabela	A.8	- Pressão estática na superfície da barra central, corrida I: $Re = 33000$	81

Tabela A.9	- Pressão estática na superfície da barra periférica, corrida I: $Re = 33000$	82
Tabela A.10	- Pressão estática na superfície da barra central, corrida IV: $Re = 77000$	83
Tabela A.11	- Pressão estática na superfície da barra periférica, corrida IV: $Re = 77000$	84
Tabela A.12	- Valores da diferença de pressão no tubo de Preston, corrida I: $Re = 33000$, bar- ra central	85
Tabela A.13	- Valores da diferença de pressão no tubo de Preston, corrida I: $Re = 33000$, bar- ra periférica	86
Tabela A.14	- Valores da diferença de pressão no tubo de Preston, corrida IV: $Re = 77000$, bar- ra central	87
Tabela A.15	- Valores da diferença de pressão no tubo de Preston, corrida IV: $Re = 77000$, bar- ra periférica	88
Tabela A.16	- Tensão cisalhante na parede da barra central, corrida I: $Re = 33000$	89
Tabela A.17	- Tensão cisalhante na parede da barra periférica, corrida I: $Re = 33000$	90
Tabela A.18	- Tensão cisalhante na parede da barra central, corrida IV: $Re = 77000$	91
Tabela A.19	- Tensão cisalhante na parede da barra periférica, corrida IV: $Re = 77000$	92

Tabela	A.20	- Tensão cisalhante na forma $\tau_0/\bar{\tau}_0$, corri	
		da I: Re = 33000, barra central	93
Tabela	A.21	- Tensão cisalhante na forma $\tau_0/\bar{\tau}_0$, corri	
		da I: Re = 33000, barra periférica	94
Tabela	A.22	- Tensão cisalhante na forma $\tau_0/\bar{\tau}_0$, corri	
		da IV: Re = 77000, barra central	95
Tabela	A.23	- Tensão cisalhante na forma $\tau_0/\bar{\tau}_0$, corri	
		da IV: Re = 77000, barra periférica	96
Tabela	A.24	- Incerteza na determinação da tensão ci-	
		salhante adimensionalizada. Valores a-	
		presentados para duas situações particu	
		lares.	97

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

O elemento combustível de um reator nuclear do tipo LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor) consiste em um feixe de barras de arranjo triangular com espaçadores helicoidais entre os quais escoam o fluido refrigerante. Com o objetivo de simular o escoamento nesse tipo de geometria, construiu-se um duto hexagonal no interior do qual são colocadas sete barras com espaçadores helicoidais ligados a um circuito de ar.

A complexa geometria causada pela presença dos espaçadores, cria particularidades no escoamento que devem ser estudadas, tais como:

- o perfil de velocidade do escoamento;
- o escoamento transversal ("cross flow"), derivado da colocação dos espaçadores helicoidais;
- o valor local do coeficiente de troca de calor na superfície das barras;
- o coeficiente de atrito e a perda de carga no escoamento;
- o desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento.

No presente trabalho, uma série de medidas foi realizada para se obter a distribuição da pressão estática e da pressão cislhante na superfície das barras para duas corridas: $Re = 33000$ e $Re = 77000$, variando-se a posição axial e angular, em um passo da helicoidal. Obteve-se, ainda, o valor da queda de pressão estática e o valor do coeficiente de atrito. Foi utilizado $p/d = 1,20$ e $l/d = 15$.

O capítulo II apresenta uma revisão da literatura disponível relativa ao presente assunto.

No capítulo III é apresentado o aparato experimental, o funcionamento do circuito de ar, as características da seção de teste, assim como, os instrumentos de medida utilizados.

No capítulo IV são apresentados os resultados obtidos.

No capítulo V os resultados são comentados e algumas propostas são feitas para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA

O escoamento axial no interior de sub-canais, formados entre as barras de um elemento combustível de reatores nucleares convencionais do tipo PWR (Presurized Water Reactor) e BWR, (Boiling Water Reactor) foi exaustivamente analisado nos últimos anos. No entanto, escoamento em elementos combustíveis dos modernos reatores rápidos, do tipo LMFBR, tendo arames helicoidais como espaçadores e misturadores, apenas recentemente começou a ser estudado.

Trupp (1), na parte experimental do seu trabalho, mediu parâmetros do escoamento axial em feixe de barras com arranjo triangular. Esse estudo envolveu três seções de teste com razões p/d iguais a 1,50; 1,35 e 1,20. O objetivo consistia na obtenção de dados para definir a distribuição espacial do escoamento na célula primária, da velocidade média e das tensões de Reynolds. Para as diferentes razões p/d , Trupp obteve a dependência do coeficiente de atrito, f , com o número de Reynolds, além da distribuição da tensão cisalhante na parede da barra em função da posição angular. Carajilescov (2), também mostra o comportamento dessa tensão cisalhante local e como a sua distribuição em função do ângulo varia com o número de Reynolds. Ainda em Carajilescov os arranjos são simples, isto é, sem o espaçador. Kacker (3) utilizando um tubo circular e no interior deste diferentes arranjos com barras colocadas excêntricamente, determinou, além do coeficiente de atrito do conjunto, a distribuição da tensão cisalhante na superfície das barras e na parede interna do tubo circular, mostrando, desde então, que a distribuição da tensão de ci-

salhamento na parede das barras não apresentava nenhum comportamento sistemático com relação ao número de Reynolds. Kacker utilizou como técnica de medição da tensão de cisalhamento uma dupla tomada de pressão separada por uma lâmina ("fence"). Brighton e Jones (4) desenvolveram trabalho experimental analisando o escoamento em um anel, formado por dois tubos concêntricos. O coeficiente de atrito, considerando o escoamento totalmente desenvolvido, o regime turbulento e condições de tubo liso, nesses anéis são maiores (de 1 a 10%) que o coeficiente de atrito em tubos simples para número de Reynolds no intervalo entre 4000 e 327.000. Além disso, foi observado que o coeficiente de atrito depende somente do número de Reynolds, independendo da relação entre os raios dos círculos que compõe o anel. Essa mesma conclusão foi também obtida por Quarmby (5).

Sangster (6) propõe um método de cálculo da queda de pressão axial no conjunto de um arranjo triangular de barras com arame helicoidal como separador, partindo do coeficiente de atrito para tubos lisos dado pela equação de Blasius (ver, por exemplo, referência 10), e incluindo a influência das relações p/d e l/d em dois parâmetros, Y e Z.

Sangster mostra o comportamento desses parâmetros:

$Y = Y(p/d)$, $Z = Z(l/d)$ e $f_b = f_b(Re)$, e como o coeficiente de atrito de Blasius é modificado através dos dois fatores.

Novendestern (12) seguiu o mesmo caminho de Sangster (6) ao determinar as correlações para o cálculo do coeficiente de atrito, usando dados mais recentes e outras pequenas modificações no método.

Lafay (7) et al. realizaram trabalho experimental sobre o comportamento do escoamento em um feixe de 19 barras usando arame helicoidal como espaçador. O campo de pressões estáticas nas faces do hexágono foi medido, ficando determinado que a distribuição de pressão numa seção reta do escoamento não é hidrostática. Usando uma técnica de visualização com bolhas, foi determinado o campo de velocidade e comparado com o valor previsto teoricamente, assumindo que o escoamento segue o ângulo da helicoidal. Lafay ainda mostra que o campo de pressões e o escoamento induzido pelo arame são extremamente dependentes da localização dos espaçadores e são periódicos com a posição. A tabela II.1, apresenta um resumo dos principais trabalhos executados em escoamentos axiais em feixes de barras.

TABELA II.1 - Trabalhos realizados sobre escoamento de fluidos em feixes de barras

Autores	trabalho		seção de teste	faixa do $\#$ de Re 10^{-3}	p/d	tipo de medidas que foram efetivadas
	analítico	experimental				
Truupp		✓		24-84 12-72 12-60	1,50 1,35 1,20	coeficiente de atrito, f tensão cisalhante na parede das barras, τ_0
Carajilesco	✓			27-270	1,217 1,123	tensão cisalhante na parede das barras, τ_0
Kacker		✓		37-215		coeficiente de atrito, f tensão cisalhante na parede das barras, τ_0
Brighton		✓		46-327		coeficiente de atrito, f
Quarmby		✓		80		coeficiente de atrito, f
Sangster			modelo semi-empírico utilizado dos dados de outros autores	4-100	1,14 até 1,30	coeficiente de atrito, f
Novendstern			modelo semi-empírico utilizado dos dados de outros autores	4-220	1,1 até 1,40	coeficiente de atrito, f
Lafay		✓		3-28	1,19	distribuição da pressão estática nas paredes do duto.

CAPÍTULO III - APARATO EXPERIMENTAL

As seções seguintes descrevem o projeto, a construção e o funcionamento do circuito de ar, da seção de teste, do tubo de Pitot e do tubo de Preston que são utilizados para medidas do número de Reynolds e parâmetros do escoamento, respectivamente. São descritos, ainda, a utilização e calibração dos instrumentos de medição.

III.1 - Circuito de Ar

O circuito de ar consiste em um ventilador ligado a uma câmara plena conforme é mostrado na figura III.1. O circuito trabalha em sistema aberto. A seleção do ventilador fundamentou-se em estimativa da perda de carga em todo o circuito e na pressão necessária na câmara plena para manter um número de Reynolds na seção de teste próximo de 10^5 . O ventilador foi fabricado pela firma MARELLI, e suas características são apresentadas na tabela III.1.

TABELA III.1 - Dados do ventilador

Ventilador centrífugo

vazão (m^3/min)	86
pressão (mmca)	700
rotação (rpm)	3450
potência (cv)	10

A câmara plena tem por objetivo regularizar o escoamento de

ar na entrada da seção de teste. O volume dessa câmara é de $0,25 \text{ m}^3$. Na saída da câmara plena foi colocada a seção de teste verticalmente. Maiores detalhes sobre o projeto e a construção do aparato estão no Apêndice C.

III.2 - Seção de Teste

A seção de teste simula um feixe de sete barras de elemento combustível de um reator do tipo LMFBR. As dimensões foram ampliadas em uma escala de 5:1, com relação as dimensões do reator real, a fim de que as dimensões dos instrumentos de medição fossem compatíveis com as dimensões internas da seção de teste.

A distribuição das sete barras com os respectivos espaçadores é mostrada na figura III.2a. Este arranjo corresponde a uma seção reta da seção de teste, e pode-se, através desta figura, visualizar os sub-canais retangulares, angulares e triangulares formados. Para a fabricação destas barras foi usado tubo Manesman trefilado e polido, de aço carbono comum, sendo as dimensões apresentadas nas figuras III.2 e III.3, possuindo o Apêndice C maiores detalhes. Para a montagem da helicoidal a relação $p/d = 1,20$ foi utilizada. Os espaçadores foram construídos com vergalhões de cobre eletrolítico posteriormente recozidos, devido a sua flexibilidade, e a sua fixação aos tubos de aço foi feita com parafusos espaçados de 10 cm, figura C 3.

A figura III.3 mostra um esboço completo da construção da seção de teste; paredes, barras e espaçadores, material usado e algumas dimensões. A parte que compõe o duto foi construída em quatro peças independentes, com o objetivo de facilitar a mon-

VISTA GLOBAL DA SEÇÃO DE TESTE

tagem da estrutura e melhor acabamento interno nas superfícies. O duto, é composto por duas placas de acrílico transparente e duas peças de madeira, do tipo sucupira, usinadas em V com um ângulo de 120°, compondo, assim, dois lados do hexágono por peça. Outros detalhes de montagem e construção podem ser vistos no Apêndice C.

Para se efetuar as medidas locais da tensão cisalhante na parede das barras em função da posição axial foi necessário implementar um mecanismo de posicionamento das barras. A localização do tubo de Preston (para medida da tensão cisalhante local) é axialmente fixa. A posição da hélice pode ser variada, girando as sete barras simultaneamente de um mesmo ângulo, α . Esta nova posição da hélice pode ser interpretada como sendo uma diferente posição axial relativa a posição inicial, tida como de referência. A ilustração dessa mudança de posição é feita na figura III.4. Quando as barras sofrem uma rotação de 360° corresponde a uma mudança axial de um passo da helicoidal. Para uma rotação α (em graus) das barras, a mudança de coordenada axial (x) é representada por:

$$x = \frac{\alpha}{360} \ell \quad (\text{III.1})$$

Para uma dada posição da hélice, medidas locais da tensão de cisalhamento, em função da posição angular, são obtidas através da rotação do ponto de medida com relação a helicoidal. Isto é feito girando-se um pequeno trecho da barra de teste, contendo o ponto de medição. Este trecho move-se livre de todo o resto da seção de teste, inclusive da helicoidal que o envol-

DETALHE DO SISTEMA DE ROTAÇÃO DAS BARRAS

ve.

A fixação e rotação destas barras são mostradas no Apêndice C.

III.3 - Instrumentação

As tomadas de pressão estática ao longo de uma das faces do duto hexagonal devem ser feitas cuidadosamente, pois a permanente mudança de geometria da seção estudada faz com que a pressão em uma seção reta da seção de teste não seja uniforme (7). As tomadas de pressão estática ao longo da direção axial do duto, por esta razão, devem ser espaçadas de um comprimento λ , quando são comparadas duas tomadas sobre a mesma face do hexágono, isto é, elas devem ser colocadas em locais que correspondam a uma mesma posição das helicoidais, conforme mostra a figura III.5.

Além destas tomadas de pressão, outras foram colocadas sobre a parede do duto, na região em que supõem-se que o escoamento já seja totalmente desenvolvido, a fim de ter-se dados da variação da pressão estática na parede do duto. Desta forma, utilizando-se a mesma técnica já descrita, de rotação das barras, com uma fileira de tomadas de pressão, em uma das faces do hexágono, pode-se obter toda a distribuição da pressão estática nas paredes do duto. O esquema dessas tomadas é mostrado na figura III.6.

A medida da tensão cisalhante na parede das barras é feita através de um tubo de Preston, que consta de duas tomadas de pressão; uma estática e outra de estagnação. Os detalhes de mon

tagem do tubo de Preston sobre a superfície da barra são mostrados na figura III.7. A tomada da pressão de estagnação é construída com base numa agulha hipodérmica de aço de 0,42 mm de diâmetro externo e 0,2 mm de diâmetro interno. A tomada da pressão estática foi feita sobre a própria superfície da barra com um furo de 0,8 mm de diâmetro, estando sua posição sobre o eixo axial, a 1 mm da tomada de pressão de estagnação. Esta disposição de tomada de pressão estática evita os efeitos da componente transversal do escoamento, induzida pela hélice.

Para a medida da vazão foi utilizado um tubo de Pitot, montado em um mecanismo de posicionamento, instalado a 5,5 m do ventilador sobre o tubo de alimentação, de PVC rígido com 5 polegadas de diâmetro e 6 m de comprimento, que serve de ligação entre o ventilador e a câmara plena. O mecanismo de posicionamento é mostrado na figura III.8. Através do Pitot é levantado o perfil de velocidade no tubo e integrado a fim de se obter o valor da velocidade média e, desta forma, a vazão.

A calibração dos tubos de Pitot e Preston foi feita utilizando-se um calibrador TSI, modelo 1125 OR.. As curvas de calibração desses instrumentos são apresentadas nas figuras III.9 e III.10. Durante a calibração observou-se que as leituras ocorriam de forma repetitiva.

O controle da vazão de ar no circuito foi feito através de uma válvula borboleta de regulação contínua instalada na sucção do ventilador. As medidas foram efetuadas na faixa de número de Reynolds entre 33000 e 77000.

SISTEMA DE POSICIONAMENTO DO TUBO DE PITOT

A seleção de leitura das tomadas de pressão estática é efetuada através de dois comutadores de pressão, com 16 entradas cada um, sendo a leitura feita em um único manômetro. Detalhes dos comutadores podem ser vistos no Apêndice C.

A temperatura do fluxo de ar foi medida por um termômetro de resistência Mettler tipo TM16, instalado no tubo de alimentação a jusante do tubo de Pitot, conforme esquema da figura III.1.

Como instrumentos de leitura foram utilizados apenas manômetros em U e inclinados. Os manômetros usados são apresentados na tabela III.2.

TABELA III.2 - Manômetros Utilizados

TIPO DE MANÔMETRO	ESCALA DE LEITURA	ERRO	UTILIZAÇÃO
	mmca	mmca	
manômetro em U	100 - 0 - 100	$\pm 1,0$	leitura do Δp do tubo de Preston leitura da p estática na barra
manômetro em U	100 - 0 - 100	$\pm 1,0$	leitura do Δp do tubo de Pitot
manômetro em U	0 - 760	$\pm 2,0$	leitura da pressão na câmara plena (p_0) leitura da queda de pressão axial
manômetro inclinado	- 5 - 0 - 50	$\pm 0,5$	leitura do Δp do tubo de Preston
manômetro inclinado	- 5 - 0 - 50	$\pm 0,5$	leitura da pressão estática na face A do duto
manômetro inclinado	0 - 15	$\pm 0,1$	leitura da pressão estática na face A do duto

Figura III.1.1 - Vista geral do aparato

Figura III. 2a - Distribuição das sete barras com os arames helicoidais

cotas em mm
sem escala

Figura III. 2b - Vista longitudinal de uma barra

cotas em mm
sem escala

Figura III.3 - Secção reta do conjunto
da seção de teste

cotas em mm
sem escala

Figura III.4 - Representação da "mudança aparente" de posição axial, através da rotação conjunta das barras

$l/6 = 125\text{mm}$

Figura III.5 - Distribuição das tomadas de pressão estática ao longo da direção axial

sem escala

Figura III.6 - Distribuição das tomadas de pressão estática na direção transversal, sobre uma das faces do duto hexagonal

sem escala

Figura III.7 - Montagem do tubo de Preston

Figura III.8 - Mecanismo de posicionamento do tubo de Pitot

FIGURA III-9 curva de calibração do
tubo de Preston

FIGURA III - 10 - Curva de calibração do tubo de Pitot

CAPÍTULO IV - RESULTADOS

A queda da pressão estática na direção axial foi obtida para quatro corridas: $Re = 33000$, $Re = 49000$, $Re = 71000$ e $Re = 77000$. As distribuições da pressão estática e da tensão cisalhante na superfície das barras, em função dos ângulos α e θ foram obtidos em duas corridas: $Re = 33000$ e $Re = 77000$.

IV.1 - Desenvolvimento do Escoamento

Usualmente, estima-se que o escoamento turbulento, nessa faixa de número de Reynolds, tem seu perfil hidrodinâmico totalmente desenvolvido quando $x/d_h > 40$ (ver, por exemplo, referência 1). A determinação dessa relação é normalmente feita, através da curva do gradiente axial de pressão, observando-se a posição em que tal curva assume um perfil linear.

Foram fixadas tomadas de pressão estática nas paredes do duto hexagonal, conforme mostra a figura III.5. Os dados recolhidos são apresentados nas tabelas A3, A4, A5 e A6, para os quatros números de Reynolds utilizados. A posição $x = 0$ corresponde a entrada do duto hexagonal, e sua pressão é tomada na câmara plena (p_0). Essa pressão é utilizada como referência para as demais tomadas ao longo da direção axial. Convém salientar, no entanto, que a queda de pressão proveniente da contração que o escoamento sofre na entrada da seção de teste não foi subtraída dos valores apresentados.

Os resultados são mostrados nas figuras IV.1, IV.2, IV.3 e IV.4.

A primeira tomada de pressão, $x = 125$ mm, já se encontra no trecho da curva em que o gradiente de pressão é constante ($\partial \bar{p} / \partial x = \text{cto}$). Por esta razão, não se pode determinar o comprimento necessário para o desenvolvimento, mas apenas concluir que no local da primeira tomada de pressão ($x/d_h = 5$) o escoamento é desenvolvido, nas quatro corridas.

IV.2 - Coeficiente de Atrito

Em um escoamento totalmente desenvolvido o coeficiente de atrito, f , é definido por:

$$f = \frac{(\Delta \bar{p} / \Delta x) \cdot 2 \cdot d_h}{\rho \bar{u}^2} \quad (\text{IV.1})$$

onde $(\Delta \bar{p} / \Delta x)$ é o gradiente axial de pressão, d_h o diâmetro hidráulico da seção de teste, ρ a densidade do fluido e $\bar{u}$ a velocidade média do fluido. O cálculo de f foi feito utilizando-se o gradiente axial de pressão determinado no item IV.1. Para o cálculo do diâmetro hidráulico foi empregado o conceito usual de superfície de cisalhamento (ver, por exemplo, referências 6 e 12) e as expressões indicadas no esquema da página 25 de onde pode ser obtido o diâmetro hidráulico, a área de escoamento e o perímetro molhado para os 3 tipos de sub-canais. Na tabela IV.1 estão indicados os valores desses parâmetros. A velocidade média, $\bar{u}$, é obtida pela lei da conservação de massa entre o escoamento na seção de teste e a taxa de fluxo de massa na tubulação de alimentação, cujo valor é indicado na tabela A.2, para cada corrida efetuada.

Sangster (6) desenvolveu um modelo semi-empírico, para po-

TABELA IV.1 - Diâmetros hidráulicos dos sub-canais

Tipo do sub canal Parâmetro	1	2	3	Total
nº de sub-canais	6	6	6	==
A_{ji} (mm ²)	538	1079	383	11997
P_{mi} (mm)	94	154	72	1922
d_{hi} (mm)	22,8	28,0	21,3	25,0

$$d_h = \frac{4A_j}{P_m} \quad (\text{IV.2})$$

$$A_{j1} = \left\{ \left[\frac{\sqrt{3}}{4} - \frac{\pi}{8} \right] \left(\frac{p}{d} \right)^2 + \frac{\pi}{4} \left(\frac{p}{d} \right) - \frac{\pi}{4} \right\} \cdot d^2 \quad (\text{IV.3a})$$

$$P_{m1} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{p}{d} \right) \cdot d \quad (\text{IV.3b})$$

$$A_{j2} = \left[\left(1 - \frac{\pi}{8} \right) \left(\frac{p}{d} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{p}{d} \right) - \frac{\pi}{4} \right] \cdot d^2 \quad (\text{IV.4a})$$

$$P_{m2} = \left(1 + \frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{p}{d} \right) \cdot d \quad (\text{IV.4b})$$

$$A_{j3} = \left[\left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\pi}{24} \right) \left(\frac{p}{d} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{12} - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{p}{d} \right) + 0,15 - \frac{\pi}{12} \right] \cdot d^2 \quad (\text{IV.5a})$$

$$P_{m3} = \left[\left(\frac{\pi}{6} + \frac{2}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{p}{d} \right) - \frac{1}{\sqrt{3}} \right] \cdot d \quad (\text{IV.5b})$$

der prever a queda de pressão estática no tipo de geometria estudada. No método proposto por Sangster, denominado de método XYZ, o coeficiente de atrito é obtido por uma correção do coeficiente de Blasius, expressa pela equação abaixo

$$f = YZ f_b \quad (IV.6)$$

onde

$$f_b = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (IV.7)$$

$$Z = \frac{4,76}{(L/d)^{0,47}} \quad (IV.8)$$

$$Y = 1,048 (p/d)^{0,37} \quad ; \quad 1,195 < p/d < 1,255 \quad (IV.9)$$

Além dos fatores Y e Z, Sangster apresenta um fator de distribuição do escoamento, X, definido por:

$$X = \frac{1}{n_1 + n_2 \left(\frac{A_{f2}}{A_{f1}} \right) \left(\frac{d_{h2}}{d_{h1}} \right)^{0,715} + n_3 \left(\frac{A_{f3}}{A_{f1}} \right) \left(\frac{d_{h3}}{d_{h1}} \right)^{0,715}} \quad (IV.10)$$

Novendestern (12) seguiu o mesmo caminho que Sangster para determinar a correlação do coeficiente de atrito, usando resultados mais recentes e modificando ligeiramente o método. Novendestern englobou os fatores Y e Z em um só, representado por:

$$M = \left[\frac{1,034}{(p/d)^{0,124}} + \frac{29,7 (p/d)^{0,34} Re^{0,086}}{(L/d)^{2,239}} \right]^{0,885} \quad (IV.11)$$

e o fator de distribuição do escoamento

$$X = \frac{A_f}{n_1 A_{f1} + n_2 A_{f2} \left(\frac{d_{h2}}{d_{h1}} \right)^{0,714} + n_3 A_{f3} \left(\frac{d_{h3}}{d_{h1}} \right)^{0,714}} \quad (IV.12)$$

Na tabela IV.2 são apresentados os resultados obtidos, utilizando-se os métodos de Sangster e Novendestern, assim como

TABELA IV.2 - Comparação entre os coeficientes de atrito obtidos por trabalhos diferentes.

Sangster

CORRIDA	Q (m ³ /s)	W (kg/s)	W_i (kg/s)	Re_i $\times 10^{-4}$	f_b	f	$\Delta \bar{P}/\Delta x$ (kg _f /m ² /m)
	medido	$\rho \cdot Q$	$X \cdot W$	$\frac{W_i \cdot d_{hi}}{A_{ji} \cdot \gamma \cdot P}$	$\frac{0,316}{Re_i^{0,25}}$	$f_b \cdot YZ$	$f \left(\frac{W_i}{A_{ji}} \right) \frac{1}{2g \rho d_{hi}}$
I	0,2591	0,2954	0,0123	2,8	0,0245	0,0366	38
II	0,3822	0,4357	0,0182	4,1	0,0222	0,0332	75
III	0,5554	0,6332	0,0264	6,0	0,0202	0,0302	143
IV	0,6026	0,6870	0,0286	6,5	0,0198	0,0296	164

Novendstern

CORRIDA	$\bar{u}$ (m/s)	$\bar{u}_i$ (m/s)	Re_i $\times 10^{-4}$	f_b	M	f	$\Delta \bar{P}/\Delta x$ (kg _f /m ² /m)
	medido	$X \cdot \bar{u}$	$\frac{\bar{u}_i \cdot d_{hi}}{\gamma}$	$\frac{0,316}{Re_i^{0,25}}$	eq. (IV.11)	$M \cdot f_b$	$f \frac{\rho \cdot \bar{u}_i^2}{2g d_{hi}}$
I	21,6	20,1	2,8	0,0245	1,517	0,0372	38
II	31,9	29,6	4,1	0,0222	1,534	0,0341	76
III	46,3	43,0	6,0	0,0202	1,551	0,0313	148
IV	50,2	46,6	6,5	0,0198	1,554	0,0308	171

Presente Trabalho

CORRIDA	$\bar{u}$ (m/s)	$\bar{u}_i$ (m/s)	Re_i $\times 10^{-4}$	$\Delta \bar{P}/\Delta x$ (kg _f /m ² /m)	f	$(\Delta \bar{P}/\Delta x)^i$ (kg _f /m ² /m)	f^i
	medido	$X \cdot \bar{u}$	$\frac{\bar{u}_i \cdot d_{hi}}{\gamma}$	medido	$\frac{(\Delta \bar{P})}{(\Delta x)} \frac{2g d_{hi}}{\rho \bar{u}_i^2}$	medido	$\frac{(\Delta \bar{P})^i}{(\Delta x)} \frac{2g d_{hi}}{\rho \bar{u}_i^2}$
I	21,6	20,1	2,8	20	0,0194	32	0,0310
II	31,9	29,6	4,1	43	0,0192	71	0,0318
III	46,3	43,0	6,0	83	0,0176	135	0,0286
IV	50,2	46,6	6,5	106	0,0191	176	0,0318

os valores encontrados no presente trabalho. Estes resultados são apresentados na figura IV.5.

IV.3 - Distribuição da Pressão Estática nas Paredes do Duto

As distribuições das pressões estáticas nas paredes do duto hexagonal são apresentadas na tabela A.7 e plotadas nas figuras IV.6 até IV.11. São indicados, para comparação, os valores da pressão média na secção, para os dois números de Reynolds estudados. Estes valores médios foram obtidos utilizando-se a expressão do coeficiente de atrito, indicada na equação IV.1 .

IV.4 - Distribuição da Pressão Estática e da Tensão Cisalhante na Superfície das Barras

As medidas da pressão estática na superfície das barras foram efetuadas através da tomada estática do tubo de Preston e estão indicadas na tabela A.8 até A.11. Estes resultados estão plotados na figura IV.12 à IV.23.

Nos gráficos, os valores da pressão foram adimensionalizados pela pressão atmosférica (10330 mmca), para $Re = 33000$ e $Re = 77000$. As pressões médias na secção, calculadas através do coeficiente de atrito, são apresentadas para comparação.

A distribuição da tensão cisalhante foi obtida para dois números de Reynolds e em função do ângulo (θ), ao longo da superfície das barras. A tensão cisalhante média ($\bar{\tau}_0$) foi obtida para cada barra separadamente por integração numérica dos

valores locais, conforme é mostrado nas tabelas A.16, A.17.A.18 e A.19. O intervalo das rotações do ângulo α é de 30° , enquanto para o ângulo θ é de 15° . A tensão cisalhante, adimensionalizada pela tensão cisalhante média, é plotada nas figuras IV.24 à IV.35. Para cada uma delas é fixada a posição axial (através do ângulo α) e a barra (periférica ou central) conforme indicado nas figuras.

Como as leituras são feitas em manômetros diferenciais, estima-se o erro da leitura como a metade da menor divisão da escala, cujos valores são indicados na tabela III.2. As calibrações dos tubos de Preston e Pitot também permitem uma avaliação de erro aleatório máximo cujos valores são $\pm 2,0\%$ e $\pm 5,0\%$, respectivamente. Existe ainda a incerteza do posicionamento angular, para α e θ , cujo valor é representado pela metade da menor divisão na escala do transferidor e é igual a 15° . Na medida da vazão estima-se um erro acumulado da ordem de $\pm 9\%$, entre a integração e a variação da secção do tubo.

Aplicando em conjunto o erro da escala de leitura e aquele da calibração do tubo de Preston sobre os valores da tensão cisalhante adimensionalizada, para uma posição fixa de $\alpha = 0^\circ$, determina-se a incerteza dos valores obtidos, conforme é mostrado nas figuras IV.36 e IV.37.

Figura IV.1 - Queda de pressão estática ($\Delta \bar{p}_{xx}$), $Re = 33000$

Figura IV.3 -- Queda de pressão estática ($\Delta \bar{p}_{xx}$), $Re = 71000$

Figura IV.4 - Queda de pressão estática (Δp_{xx}), $Re = 77000$

Figura IV.5 - Coeficiente de atrito em função do número de Reynolds

Figura IV.6 - Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal,
 $\alpha = 0^\circ$

Figura IV.7 - Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal,
 $\alpha = 60^\circ$

Figura IV.8 - Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal,
 $\alpha = 120^\circ$

Figura IV.9 - Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal,
 $\alpha = 180^\circ$

Figura IV.10 - Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal,
 $\alpha = 240^\circ$

Figura IV.11 - Distribuição da pressão estática na face do duto hexagonal,
 $\alpha = 300^\circ$

Figura IV.12 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 0^\circ$

Figura IV.13 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 60^\circ$

Figura IV.14 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 120^\circ$

Figura IV.15 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 180^\circ$

Figura IV.16 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 240^\circ$

IV.17 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 300^\circ$

Figura IV.18 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 0^\circ$

Figura IV.19 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 60^\circ$

Figura IV.20 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 120^\circ$

Figura IV.21 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 180^\circ$

Figura IV.22 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 240^\circ$

Figura IV.23 - Distribuição da pressão estática na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 300^\circ$

Figura IV.24 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 0^\circ$

Figura IV.25 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 60^\circ$

Figura IV.26 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 120^\circ$

Figura IV.27 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 180^\circ$

Figura IV.28 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 240^\circ$

Figura IV.29 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra periférica em função de θ , $\alpha = 300^\circ$

Figura IV.30 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 0^\circ$

Figura IV.31 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 60^\circ$

Figura IV.32 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 120^\circ$

Figura IV.33 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 180^\circ$

Figura-IV.34 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 240^\circ$

Figura IV.35 - Distribuição da tensão cisalhante na superfície da barra central em função de θ , $\alpha = 300^\circ$

Figura IV.36 - Determinação da incerteza para a tensão cisalhante adimensionalizada, para $Re = 77000$, $\alpha = 0^\circ$ e barra periférica

Figura IV.37 - Determinação da incerteza para a tensão cisalhante adimensionalizada, para $Re = 33000$, $\alpha = 0^\circ$ e barra periférica

CAPÍTULO V - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A tabela IV.2 e a figura IV.5 apresentam os resultados para o coeficiente de atrito obtidos pelos métodos de Sangster(6), Novendstern (12) e por este trabalho. A comparação desses resultados mostra que os métodos de Sangster e Novendstern fornecem valores 200% acima dos encontrados neste trabalho. Novendstern comenta que nos dados por ele utilizados (trabalho de Rehme) o gradiente axial de pressão foi obtido com duas tomadas, uma na entrada e outra na saída da seção de teste.

Não se conseguiu, no entanto, maiores informações sobre as posições destas tomadas de pressão. Considerando que esse conjunto de resultados pode representar definições distintas, uma vez que pode englobar quedas de pressão devido a variação de área e desenvolvimento do escoamento, optou-se em não compará-los rigorosamente. Na tabela IV.2 e na figura IV.5 são apresentados os valores obtidos para os três casos. A título de ilustração, nessa tabela e figura são apresentados um coeficiente de atrito f' e um gradiente de pressão $(\Delta\bar{p}/\Delta x)^1$, onde este último representa a diferença total de pressão entre a entrada e a saída da seção de teste dividido pelo comprimento total da mesma, enquanto f' é o coeficiente de atrito associado a este $(\Delta\bar{p}/\Delta x)^1$. Convém salientar que no valor desse gradiente de pressão está incluída a queda de pressão proveniente da contração na entrada da seção de teste. A utilização de f' aproxima os valores do coeficiente de atrito para os encontrados pelos métodos de Sangster e Novendstern, reforçando a hipótese de que tais métodos utilizam a queda total de pressão para definir

o coeficiente de atrito, enquanto o presente trabalho o define através do gradiente axial de pressão apenas para o trecho desenvolvido do escoamento.

Os resultados para o campo de pressões estáticas nas paredes do duto estão de acordo com aqueles obtidos por Lafay (7) e observa-se que, de fato, a pressão estática não é uniforme sobre a secção. Observa-se ainda a influência das helicoidais: para diferentes valores do ângulo α , o comportamento da pressão estática na parede do duto é totalmente distinto.

Para $\alpha = 0^\circ$, figura IV.7, observa-se que o valor da pressão média da face medida é 36% do valor da pressão média da secção, enquanto que para $\alpha = 120^\circ$, figura IV.9, a pressão média na face é 20% maior que a pressão média na secção, ainda por influência do posicionamento relativo das helicoidais.

Nas medidas da pressão estática na superfície das barras identificou-se que invariavelmente, no escoamento abaixo da helicoidal, estas medidas apresentam valores superiores aos do escoamento por cima dessa mesma helicoidal. Além disso, pode-se notar, sistematicamente, pontos de baixa pressão para a particular posição das barras mostradas na figura V.1.

Figura V.1 - Zona de baixa pressão

Sempre que essa posição se repete constata-se uma zona de baixa pressão (indicada na figura), sendo que na barra periférica a queda de pressão é mais acentuada que no caso da barra central.

A identificação dessa região, com as variações bruscas na pressão (ver figura IV.12), deve ser considerada na análise de eventuais mudanças de fase locais provocadas pela possibilidade de surgimento de bolhas de cavitação no fluido.

A razão entre a tensão cisalhante local e a tensão cisalhante média na barra, $(\tau_0/\bar{\tau}_0)$, foi observada não ser dependente do número de Reynolds (figuras IV.24 à IV.35). Além disso, outra observação que pode ser verificada é a amplitude da variação que $\tau_0/\bar{\tau}_0$ sofre em função de θ . Em situações extremas observou-se $\tau_0/\bar{\tau}_0 \simeq 0,23$ e $\tau_0/\bar{\tau}_0 \simeq 1,8$.

Tal fato não foi observado nos trabalhos de Trupp (1) e Carajilescov (2), pois não incluíram os espaçadores helicoidais.

Apresenta-se a seguir algumas sugestões de trabalhos para dar continuidade a este estudo:

- 1 - obtenção do campo de velocidade, axial e transversal;
- 2 - distribuição da tensão cisalhante na direção transversal sobre a superfície das barras, a fim de determinar o coeficiente local de troca de calor utilizando-se uma analogia de transferência de calor-quantidade de movimento;
- 3 - obter resultados para uma maior quantidade de números de Reynolds;
- 4 - determinação do comprimento de desenvolvimento hidrodinâmico, para esse tipo de geometria;

- 5 - repetição destas experiências utilizando-se uma seção de teste com um número maior de barras, para diminuir as influências das paredes do duto sobre o escoamento.
-

REFERÊNCIAS

1. TRUPP, A. C. - "The Structure of Turbulent Flow in Triangular Array Rod Bundles", Tese Ph.D, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Manitoba, Winnipeg, Canadá (1973).
2. CARAJILESCOV, P. e TODREAS, N. E. - "Experimental and Analytical Study of Axial Turbulent Flows in an Interior Subchannel of Bare Rod Bundle", ASME Publication 75-WA/HT-51, (1976).
3. KACKER, S. C. - "Some Aspects of Fully Developed Turbulent Flow in Non-circular Ducts", J. Fluid Mech., Vol. 57, part 3, (1973), pp. 583.
4. BRIGHTON, J. A. e JONES, J. B. - "Fully Developed Turbulent Flow in Annuli", J. of Basic Eng., (1964), pp. 835.
5. QUARMBY, A. - "An Experimental Study of Turbulent Flow Through Concentric Annuli", Int. J. Mech. Science, Vol.9, (1967), pp. 205.
6. SANGSTER, W. A. - "Calculation of Rod Bundle Pressure Loss", ASME Paper 68 - WA/HT - 35, (1968).
7. LAFAY, J., MENANT, B. e BARROIL, J. - "Local Pressure Measurements and Peripheral Flow Visualization in a Water 19 - Rod Bundles Compared with FLICA II B Calculations: Influence of Helical Wire-Wrap Spacer System", Meeting on the Liquid Metal Boiling Working Group, Risley, UK, CEA-CONF-3491, (1975).
8. TENNEKES, H. e LUMLEY, J. L. - A First Course in Turbulence, The MIT Press, 2^a edição, (1972).
9. BENEDICT, R. P. - Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements, John Wiley & Sons, Inc., (1969).
10. SCHILICHTING, M. - Boundary-Layer Theory, 6^a ed. McGraw-Hill, (1968).
11. DAILY, J. W. e HARLEMAN, D. R. F. - Dinâmica de los Fluidos, Ed. F. Trillas, (1969).

12. 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, (1971), pp.19.
13. PATEL, V. C. - "Calibration of the Preston Tube and limitations on its use in pressure gradients", J. Fluid Mech., Vol. 23, part 1, (1965), pp. 185.

APÊNDICE A

TABELA A.1 - Perfil de velocidade no tubo de alimentação

	Corrida I		Corrida II		Corrida III		Corrida IV	
y	Leitura Pilot	Veloci- dade	Leitura Pilot	Veloci- dade	Leitura Pilot	Veloci- dade	Leitura Pilot	Veloci- dade
mm.	mmca	m/s	mmca	m/s	mmca	m/s	mmca	m/s
0.0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0	15	16,0	34	24,0	67	33,7	89	38,9
2.0	16	16,5	35	24,4	71	34,7	94	39,9
3.0	16	16,5	38	25,4	75	35,7	97	40,6
4.0	17	17,0	40	26,1	78	36,4	102	41,6
5.0	18	17,5	42	26,7	82	37,3	105	42,2
7.5	19	18,0	44	27,3	88	38,6	111	43,4
10.0	20	18,4	46	27,9	91	39,3	116	44,4
12.5	21	18,9	48	28,5	94	39,9	120	45,1
15.0	21	18,9	50	29,1	97	40,6	123	45,7
17.5	22	19,3	51	29,4	100	41,2	126	46,2
20.0	23	19,8	52	29,7	100	41,2	128	46,6
25.0	24	20,2	54	30,3	103	41,8	133	47,5
30.0	24	20,2	56	30,8	106	42,4	137	48,2
35.0	25	20,6	57	31,1	107	42,6	141	48,9
40.0	26	21,0	59	31,6	108	42,8	144	49,4
45.0	26	21,0	60	31,9	109	43,0	146	49,8
50.0	27	21,4	61	32,2	110	43,2	147	50,0
55.0	27	21,4	61	32,2	112	43,6	148	50,1
60.0	27	21,4	62	32,4	112	43,6	149	50,3
65.0	27	21,4	62	32,4	112	43,6	151	50,6
70.0	27	21,4	62	32,4	112	43,6	151	50,6
75.0	27	21,4	62	32,4	112	43,6	151	50,6
$\bar{v}$		18,1		26,7		38,8		42,1

TABELA A.2 - Parâmetros associados com as corridas efetuadas

PARÂMETROS	EXPRESSÕES	UNIDADES	I	II	III	IV
T	medido	°C	33,5	34,0	33,8	34,0
ρ	rej. [10]	kg/m ³	1,14	1,14	1,14	1,14
$\bar{v} \cdot 10^5$	rej. [10]	m ² /s	1,64	1,64	1,64	1,64
$\bar{V}$	integrado do perfil da tab. A1	m/s	18,1	26,7	38,8	42,1
$\bar{U}$	$\frac{A_0}{A_f} \bar{V}$	m/s	21,6	31,9	46,3	50,2
Q	$A_0 \bar{V}$	m ³ /s	0,2591	0,3822	0,5554	0,6026
$Re \cdot 10^{-4}$	$\frac{\bar{U} \cdot d_n}{\nu}$	—	3,3	4,9	7,1	7,7

TABELA A.3 - Queda de pressão ao longo da direção axial ,
corrida I: $Re \approx 33000$

Posição	α (mm)	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0	0	71	71	71	71	71	71	71	71	70	70	71	71
1	125	25	36	33	27	25	30	34	30	29	23	23	24
2	250	29	37	36	30	28	30	33	34	32	27	27	27
3	375	30	38	36	33	32	33	36	34	34	30	30	30
4	625	39	41	39	36	36	42	42	38	36	34	36	37
5	750	43	41	40	39	39	44	43	40	39	39	38	41
6	875	46	43	42	39	41	49	46	41	41	41	41	43
7	1000	47	43	46	43	43	51	50	44	43	42	42	43
8	1125	49	47	47	46	46	51	51	47	46	46	44	47
9	1375	57	57	51	48	50	56	54	51	50	51	53	57
10	1500	58	60	55	52	53	53	56	54	54	55	57	60
11	1625	62	64	56	55	56	59	57	56	56	57	61	64
12	1750	65	65	59	57	58	62	61	58	57	58	62	65
13	1875	66	66	61	61	61	64	63	61	61	62	64	66
14	2125	69	69	65	67	69	67	66	64	64	71	71	69

(em mm ca.)

TABELA A.4 - Queda de pressão ao longo da direção axial ,
corrida II: $Re = 49000$

Posição	x (mm) \ α	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0	0	159		160		160		157		157		157	
1	125	61		76		61		81		69		56	
2	250	69		84		66		79		75		62	
3	375	71		83		74		82		77		71	
4	625	90		89		80		97		81		80	
5	750	99		93		89		99		90		84	
6	875	103		97		91		104		91		91	
7	1000	107		103		97		113		97		95	
8	1125	110		108		103		116		104		102	
9	1375	128		114		113		121		112		122	
10	1500	132		122		117		124		121		130	
11	1625	140		126		123		131		126		137	
12	1750	146		131		130		137		130		140	
13	1875	149		137		136		141		137		145	
14	2125	154		145		156		147		145		149	

(em mm ca.)

TABELA A.5 - Queda de pressão ao longo da direção axial ,
corrida III: $Re = 71000$

Posição	x (mm)	α	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0	0		293	293	295	297	296	296	295	293	293	293	293	293
1	125		113	161	147	122	114	137	152	136	130	110	102	103
2	250		128	163	160	132	126	133	150	151	141	118	105	122
3	375		136	164	156	140	140	144	154	150	146	135	132	132
4	625		168	174	166	151	149	178	182	160	152	149	151	156
5	750		185	175	173	166	166	193	185	169	173	161	159	171
6	875		193	187	180	170	173	208	197	177	171	169	168	182
7	1000		199	199	193	177	180	216	211	191	183	180	178	185
8	1125		204	206	201	192	193	218	217	196	194	191	188	194
9	1375		241	220	212	208	210	234	226	210	207	213	226	237
10	1500		246	230	229	220	217	239	232	227	226	229	241	254
11	1625		262	237	234	230	230	249	241	231	234	241	254	267
12	1750		272	251	245	240	241	264	257	240	240	246	259	274
13	1875		277	259	255	255	254	269	264	254	254	260	269	278
14	2125		286	274	269	274	288	279	274	267	269	293	297	292

(em mm ca.)

TABELA A.6 - Queda de pressão ao longo da direção axial,
corrida IV: $Re = 77000$

Posição	α (mm)	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0	0	394	396	396	396	401	396	396	394	391	391	394	391
1	125	166	208	193	157	152	191	196	178	170	152	140	142
2	250	174	216	213	175	168	180	201	201	180	157	157	163
3	375	180	213	211	188	184	188	201	198	193	178	170	175
4	625	224	231	213	197	197	237	241	211	206	196	203	207
5	750	245	234	227	221	213	257	234	235	222	213	213	226
6	875	249	246	240	221	226	277	263	234	226	226	229	241
7	1000	263	267	249	239	239	284	279	251	244	237	236	245
8	1125	269	272	264	254	249	287	288	259	257	251	251	258
9	1375	320	291	283	274	277	310	292	278	274	281	297	318
10	1500	324	305	302	291	291	312	306	302	292	304	320	338
11	1625	349	314	305	305	305	343	321	300	307	323	330	354
12	1750	362	335	325	318	319	353	330	320	319	324	331	363
13	1875	370	339	339	339	340	356	348	340	330	348	356	370
14	2125	368	356	356	368	384	373	367	353	356	398	394	389

(em mmca)

TABELA A.7 - Pressão estática na face A do duto hexagonal.

Corrida I: $Re = 3,3 \times 10^4$, $\bar{P}/P_{atm} = 7 \times 10^{-4}$

$h/d_h \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0,4	4	5	6	1	7	9	10	11	9	9	2	4
0,8	3	4	5	0	6	7	8	10	9	9	9	4
1,2	3	4	5	0	6	8	8	10	9	10	9	4
1,6	3	4	5	1	7	8	9	10	10	10	9	4
2,0	2	3	5	2	7	9	9	10	9	10	9	6
2,4	4	3	5	1	8	9	10	9	9	10	9	6
2,8	3	3	5	1	7	9	10	10	8	9	9	6
3,2	3	3	4	1	6	8	9	9	8	8	8	6
3,4	3	4	4	1	6	8	9	10	9	10	9	7

Corrida II: $Re = 7,7 \times 10^4$, $\bar{P}/P_{atm} = 43 \times 10^{-4}$

$h/d_h \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0,4	19	24	27	29	57	46	52	54	48	46	13	16
0,8	16	16	19	20	46	34	40	48	47	51	20	15
1,2	17	18	20	23	50	38	45	55	52	55	49	22
1,6	15	17	22	25	51	42	47	53	51	52	49	20
2,0	6	10	20	27	55	46	49	49	51	52	46	26
2,4	18	17	22	27	58	47	53	50	49	53	48	33
2,8	17	16	23	28	55	45	51	49	42	44	47	33
3,2	13	15	18	23	48	40	46	45	39	42	44	32
3,4	15	18	18	23	51	41	47	50	50	50	48	37

Dados na forma $\bar{P}/P_{atm} \cdot 10^4$

TABELA A.8 - Pressão estática na superfície da barra, corrida I: Re = 33000

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°	==		7		7		==		9		10	
15°	10		7		7		8		10		9	
30°	10		7		7		5		11		8	
45°	10		6		7		5		11		8	
60°	10		==		7		7		==		7	
75°	9		10		7		7		5		9	
90°	9		10		6		7		5		9	
105°	8		10		6		7		6		9	
120°	9		9		==		7		7		==	
135°	10		9		9		7		8		==	
150°	10		8		9		7		8		6	
165°	==		8		9		6		7		6	
180°	==		8		9		==		7		8	
195°	8		9		9		10		6		8	
210°	5		9		8		9		7		9	
225°	7		9		7		9		6		8	
240°	8		==		7		9		==		7	
255°	8		10		8		9		10		7	
270°	8		8		9		8		9		6	
285°	7		6		9		8		10		6	
300°	6		8		==		8		10		==	
315°	6		8		9		9		9		10	
330°	6		8		7		10		9		10	
345°	7		7		7		10		9		10	

(em mmca.)

TABELA A.9 - Pressão estática na superfície da barra periférica, corrida I: Re = 33000

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°	7		3		6		8		10		9	
15°	7		3		6		8		10		10	
30°	7		2		6		9		9		9	
45°	7		2		7		10		10		8	
60°	7				6		11				8	
75°	6		8		6		11		10		10	
90°	6		7		6		11		7		10	
105°	5		7		6		10		9		10	
120°	6		7				9		10			
135°	7		6		10		9		10		10	
150°	8		6		10		9		10		4	
165°	8		6		9		8		9		6	
180°			6		9				9		7	
195°	6		7		10		11		9		7	
210°	-2		8		10		11		9		6	
225°	1		8		10		12		10		6	
240°	3		6		9		12				6	
255°	3		6		8		9		8		7	
270°	4		6		7		8		7		6	
285°	4		5		7		8		8		6	
300°	4		5		6		8		9			
315°	4		5		6		8		9		9	
330°	4		4		5		7		9		10	
345°	4		3		5		7		9		9	

(em mm ca.)

TABELA A.10 - Pressão estática na superfície da barra central, corrida IV: Re = 77000.

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°	55	39	36	29	39	46	46	40	44	46	48	61
15°	52	39	36	33	41	46	30	45	52	50	45	55
30°	52	54	35	36	41	37	24	45	56	47	42	53
45°	51	54	32	37	40	31	41	38	55	43	40	51
60°	48	50	49	35	37	31	35	41	44	44	39	51
75°	46	48	49	32	36	33	27	43	18	51	48	52
90°	45	46	49	59	32	35	34	37	20	47	52	46
105°	44	42	50	56	32	36	43	30	32	39	51	47
120°	53	46	44	54	47	34	42	29	36	42	51	53
135°	56	44	41	52	46	34	35	32	40	35	26	43
150°	59	42	40	48	43	52	49	35	37	34	36	47
165°	40	48	46	48	44	47	52	34	34	34	39	49
180°	15	52	50	44	44	46	31	35	32	37	41	42
195°	34	47	49	44	43	43	31	54	32	38	39	30
210°	38	48	46	44	40	39	45	53	37	37	34	29
225°	37	48	36	50	47	42	43	50	50	36	32	34
240°	34	34	32	53	50	40	26	49	51	31	31	35
255°	32	32	40	50	48	39	47	46	52	55	33	33
270°	32	36	41	54	51	44	76	43	49	53	52	25
285°	35	39	40	26	44	49	66	40	47	51	50	50
300°	33	40	39	28	33	45	54	40	44	48	50	63

(em mmca)

TABELA A.11 - Pressão estática na superfície da barra periférica, corrida IV: Re = 77000

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°	18	11	18	27	33	39	47	51	49	49	50	43
15°	35	12	9	20	28	36	41	47	51	48	49	40
30°	34	11	7	21	29	38	42	49	47	47	48	38
45°	36	37	9	23	31	42	49	58	50	45	44	36
60°	36	32	11	21	29	42	52	58	50	42	42	32
75°	28	34	43	24	29	43	53	80	56	49	51	33
90°	29	31	37	27	27	43	52	67	29	57	51	30
105°	28	29	37	41	28	42	48	67	45	52	51	30
120°	28	25	37	41	28	42	45	70	49	54	51	29
135°	36	28	31	39	46	43	44	73	50	40	48	36
150°	39	25	27	39	48	57	46	74	49	35	22	44
165°	23	23	27	37	48	57	43	73	46	32	30	40
180°	21	24	24	35	46	55	43	72	45	36	34	39
195°	35	26	31	37	48	53	54	82	48	39	34	30
210°	-18	33	38	43	51	55	54	82	50	40	32	7
225°	1	23	39	44	49	57	60	44	50	43	32	8
240°	9	22	26	39	43	52	56	43	43	43	34	11
255°	14	23	26	35	37	44	46	41	35	45	33	12
270°	16	24	27	23	33	37	40	43	33	41	34	13
285°	17	23	25	25	32	37	40	42	37	41	32	13
300°	17	22	23	27	28	37	41	37	41	43	46	10
315°	19	21	19	23	22	31	34	37	43	44	46	9
330°	19	20	16	18	20	24	26	36	44	47	46	43
345°	18	18	13	16	22	26	30	44	49	48	48	43

(em mmca.)

TABELA A.12 - Valores da diferença de pressão no tubo de Preston, corrida I: Re = 33000, barra central.

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°	—	—	6	—	4	—	—	—	6	—	6	—
15°	8	—	4	—	4	—	2	—	8	—	8	—
30°	4	—	5	—	3	—	4	—	8	—	5	—
45°	4	—	6	—	5	—	6	—	3	—	3	—
60°	6	—	—	—	5	—	5	—	—	—	6	—
75°	5	—	7	—	6	—	4	—	6	—	8	—
90°	3	—	5	—	5	—	4	—	2	—	9	—
105°	2	—	4	—	1	—	6	—	4	—	3	—
120°	7	—	6	—	—	—	6	—	4	—	—	—
135°	9	—	9	—	7	—	6	—	4	—	—	—
150°	7	—	3	—	5	—	4	—	4	—	6	—
165°	—	—	4	—	5	—	4	—	5	—	4	—
180°	—	—	8	—	7	—	—	—	6	—	5	—
195°	5	—	9	—	8	—	9	—	5	—	4	—
210°	3	—	7	—	4	—	2	—	4	—	4	—
225°	6	—	5	—	1	—	4	—	2	—	5	—
240°	5	—	—	—	7	—	4	—	—	—	6	—
255°	5	—	7	—	10	—	5	—	5	—	6	—
270°	4	—	8	—	6	—	4	—	3	—	5	—
285°	6	—	4	—	8	—	2	—	4	—	7	—
300°	6	—	5	—	—	—	7	—	6	—	—	—
315°	5	—	5	—	7	—	9	—	6	—	8	—
330°	4	—	4	—	8	—	8	—	3	—	6	—
345°	3	—	5	—	5	—	5	—	2	—	4	—

(em mmca.)

TABELA A.13 - Valores da diferença de pressão no tubo de Preston, corrida I: Re = 33000, barra periférica.

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°	11				4		3		3		9	
15°	12		10		4		3		2		8	
30°	9		10		5		5		4		7	
45°	12		6		7		6		10		2	
60°	20				6		6				9	
75°	19		10		4		6		4		11	
90°	9		8		4		5		5		6	
105°	13		8		8		5		6		13	
120°	19		11				4		6			
135°	20		14		4		3		6		9	
150°	16		8		3		4		6		7	
165°	14		4		4		5		4		10	
180°			13		5				4		8	
195°	5		15		9		4		3		8	
210°	2		15		10		5		2		7	
225°	5		15		10		11		3		9	
240°	9		13		8		8				13	
255°	11		7		7		6		4		12	
270°	12		11		5		3		3		10	
285°	11		11		4		2		4		4	
300°	10		11		3		3		5			
315°	10		12		3		3		5		6	
330°	5		11		6		2		3		5	
345°	7		10		5		2		2		6	

(em mmca.)

TABELA A.14 - Valores da diferença de pressão no tubo de Preston, corrida IV: Re = 77000, barra central.

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°	—	51	45	35	37	38	—	62	60	68	59	48
15°	67	34	41	40	31	42	30	64	62	66	63	38
30°	37	—	38	43	37	49	24	64	59	30	43	30
45°	30	37	55	42	46	46	41	51	42	19	47	53
60°	52	46	—	41	51	44	35	30	—	52	60	63
75°	50	51	56	27	47	48	27	44	44	66	63	65
90°	28	32	39	—	43	48	34	47	35	64	61	52
105°	52	46	31	34	42	48	43	42	48	42	47	36
120°	68	67	59	62	—	34	45	35	38	36	—	50
135°	72	79	69	39	58	53	42	37	30	39	—	60
150°	65	78	43	35	38	—	35	39	38	40	35	55
165°	39	44	47	58	35	39	49	36	46	43	38	28
180°	—	51	71	73	54	53	—	23	48	48	35	39
195°	36	71	75	77	61	47	52	23	40	44	38	46
210°	26	70	66	64	37	34	31	—	33	41	43	50
225°	49	65	51	37	48	47	31	29	12	32	49	48
240°	42	28	—	62	71	66	45	41	—	34	52	44
255°	40	54	43	71	80	74	43	39	46	23	40	36
270°	44	57	60	67	70	62	26	26	32	—	25	36
285°	50	52	32	55	37	38	47	46	27	29	46	33
300°	48	45	43	33	—	63	67	75	52	49	—	33
315°	51	36	38	54	61	72	76	74	56	44	56	23
330°	44	30	31	54	72	68	66	51	32	28	43	—
345°	44	37	41	40	25	48	54	33	48	54	33	28

(em mmco)

TABELA A.15 - Valores da diferença de pressão no tubo de Preston, corrida IV: Re = 77000, barra periférica.

θ	∞	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°			55	64	52	46	23	29	28	42	60	63	66
15°		58	37	58	48	38	32	27	44	48	52	52	62
30°		43		64	49	42	36	42	70	71	68	38	42
45°		70	50	46	48	51	48	48	64	84	52	63	68
60°		99	65		30	50	50	53	59		76	86	91
75°		99	51	78	56	40	40	50	62	41	85	91	93
90°		50	42	51		33	31	48	66	41	83	78	62
105°		62	70	46	36	63	22	41	60	56	60	71	49
120°		82	97	75	56		39	33	52	55	63		73
135°		92	104	87	54	38	40	31	45	56	72	49	85
150°		80	80	48	37	33		33	41	58	78	48	87
165°			65	51	52	49	26	52	32	58	72	58	82
180°			77	77	68	66	49		29	52	58	51	46
195°		33	79	86	76	74	63	40	42	40	52	49	60
210°		10	82	84	79	73	70	60		35	46	43	62
225°		30	84	84	77	70	71	76	43	43	54	65	58
240°		58	36	73	73	67	70	69	80		60	79	70
255°		71	62	40	69	63	65	57	87	41	71	72	82
270°		80	77	74	54	56	56	48	77	40		63	72
285°		66	70	71	34	50	50	43	66	51	22	46	62
300°		55	63	66	55	45	49	43	58	66	42		50
315°		57	65	65	62	31	47	41	52	65	40	47	68
330°		47	70	66	62	46	45	36	46	52	54	46	
345°		24	43	65	60	53	40	33	34	32	38	49	52

(em mmca.)

TABELA A.16 - Tensão cisalhante na parede da barra central, corrida I: Re = 33000.

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°			0.96		0.73				0.96		0.96	
15°	1.18		0.73		0.73		0.46		1.18		1.18	
30°	0.73		0.85		0.60		0.73		1.18		0.85	
45°	0.73		0.96		0.85		0.96		0.60		0.60	
60°	0.96				0.85		0.85				0.96	
75°	0.85		1.08		0.96		0.73		0.96		1.18	
90°	0.60		0.85		0.85		0.73		0.46		1.29	
105°	0.46		0.73		0.30		0.96		0.73		0.60	
120°	1.08		0.96				0.96		0.73			
135°	1.29		1.29		1.08		0.96		0.73			
150°	1.08		0.60		0.85		0.73		0.73		0.96	
165°			0.73		0.85		0.73		0.85		0.73	
180°			1.18		1.08				0.96		0.85	
195°	0.85		1.29		1.18				0.85		0.73	
210°	0.60		1.08		0.73		0.46		0.73		0.73	
225°	0.96		0.85		0.30		0.73		0.46		0.85	
240°	0.85				1.08		0.73				0.96	
255°	0.85		1.08		1.40		0.85		0.85		0.96	
270°	0.73		1.18		0.96		0.73		0.60		0.85	
285°	0.96		0.73		1.18		0.46		0.73		1.08	
300°	0.96		0.85				1.08		0.96			
315°	0.85		0.85		1.08		1.29		0.96		1.18	
330°	0.73		0.73		1.18		1.18		0.60		0.96	
345°	0.60		0.85		0.85		0.85		0.46		0.73	
$\bar{\theta}$	0.88		0.95		0.93		0.85		0.81		0.93	

(em kgf/m²)

TABELA A.17 - Tensão cisalhante na parede da barra periférica, corrida I: Re = 33000.

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°	1,60		1,50		0,73		0,60		0,60		1,29	
15°	1,29		1,40		0,73		0,60		0,46		1,18	
30°	1,60		1,40		0,85		0,85		0,73		1,08	
45°	2,37		0,96		1,08		0,96		1,40		0,46	
60°	2,28				0,96		0,96				1,29	
75°	2,28		1,40		0,73		0,96		0,73		1,50	
90°	1,29		1,18		0,73		0,85		0,85		0,96	
105°	1,70		1,18		1,18		0,85		0,96		1,70	
120°	2,28		1,50				0,73		0,96			
135°	2,37		1,80		0,73		0,60		0,96		1,29	
150°	1,99		1,18		0,60		0,73		0,96		1,08	
165°	1,80		0,73		0,73		0,85		0,73		1,40	
180°			1,70		0,85				0,73		1,18	
195°	0,85		1,90		1,29		0,73		0,60		1,18	
210°	0,46		1,90		1,40		0,85		0,46		1,08	
225°	0,85		1,90		1,40		1,50		0,60		1,29	
240°	1,29		1,70		1,18		1,18				1,70	
255°	1,50		1,08		1,08		0,96		0,73		1,60	
270°	1,60		1,50		0,85		0,60		0,60		1,40	
285°	1,50		1,50		0,73		0,46		0,73		0,73	
300°	1,40		1,50		0,60		0,60		0,85			
315°	1,40		1,60		0,60		0,60		0,85		0,96	
330°	0,85		1,50		0,96		0,46		0,60		0,85	
345°	1,08		1,40		0,85		0,46		0,46		0,96	
$\bar{\theta}_0$	1,60		1,48		0,94		0,82		0,78		1,23	

(em kgf/cm²)

TABELA A.18 - Tensão cisalhante na parede da barra central, corrida IV: Re = 77000.

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°		5,05	4,55	3,70	3,88	3,96		5,95	5,78	6,43	5,70	4,80
15°	6,35	3,62	4,22	4,13	3,36	4,30	3,27	6,11	5,95	6,27	6,03	3,96
30°	3,88		3,96	4,38	3,88	4,88	2,74	6,11	5,70	3,27	4,38	3,27
45°	3,27	3,88	5,38	4,30	4,64	4,64	4,22	5,05	4,30	2,28	4,72	5,21
60°	5,13	4,64		4,22	5,05	4,47	3,70	3,27		5,13	5,78	6,03
75°	4,97	5,05	5,46	3,01	4,72	4,80	3,01	4,47	4,47	6,27	6,03	6,19
90°	3,09	3,44	4,05		4,38	4,80	3,62	4,72	3,70	6,11	5,87	5,13
105°	5,13	4,64	3,36	3,62	4,30	4,80	4,38	4,30	4,80	4,30	4,72	3,79
120°	6,43	6,35	5,70	5,95		3,62	4,55	3,70	3,96	3,79		4,97
135°	6,75	7,30	6,51	4,05	5,62	5,21	4,30	3,88	4,64	4,05		5,78
150°	6,19	7,22	4,38	3,70	3,96		3,70	4,05	4,80	4,13	3,70	5,38
165°	4,05	4,47	4,72	5,62	3,70	4,05	4,80	3,79	4,13	4,38	3,96	3,09
180°		5,05	6,67	6,83	5,30	5,21		2,65	3,53	4,80	3,70	4,08
195°	3,79	6,67	6,89	7,14	5,87	4,72	5,13	2,65	3,27	4,47	3,96	4,64
210°	2,92	6,59	6,27	6,11	3,88	3,62	3,36		3,96	4,22	4,38	4,97
225°	4,88	6,19	5,05	3,88	4,80	4,72	3,36	3,18	1,60	3,44	4,88	4,80
240°	4,30	3,09		5,95	6,67	6,27	4,55	4,22		3,62	5,13	4,47
255°	4,13	5,30	4,38	6,67	7,38	6,91	4,39	4,05	4,64	2,65	4,13	3,79
270°	4,47	5,54	5,78	6,35	6,59	5,95	2,92	2,92	3,44		2,83	3,79
285°	4,97	5,13	3,44	5,38	3,88	3,96	4,72	4,64	3,01	3,18	4,64	3,53
300°	4,80	4,55	4,38	3,53		6,03	6,35	6,99	5,13	4,88		3,53
315°	5,05	3,79	3,96	5,30	5,87	6,75	7,06	6,91	5,46	4,47	5,46	2,65
330°	4,47	3,27	3,36	5,30	6,75	6,43	6,27	5,05	3,44	3,09	4,38	
345°	4,47	3,88	4,22	4,13	2,83	4,80	5,30	3,53	4,80	5,30	3,53	3,09
$\bar{C}_0$	4,81	5,14	4,97	5,07	5,02	5,18	4,50	4,61	4,41	4,52	4,75	4,49

(em kg/m²)

TABELA A.19 - Tensão cisalhante na parede da barra periférica, corrida IV: Re = 77000.

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°		5,38	6,11	5,13	4,64	2,65	3,18	3,09	4,30	6,43	5,70	6,21
15°	5,62	3,88	5,62	4,80	3,96	3,44	3,01	4,41	4,80	6,27	6,03	5,95
30°	4,38		6,11	4,88	4,30	3,79	4,30	6,59	6,61	3,27	4,38	4,30
45°	6,59	4,91	4,64	4,80	5,05	4,80	4,80	6,11	7,69	2,28	4,72	6,43
60°	8,86	6,19		3,27	4,97	4,97	5,21	5,30		5,13	5,78	8,24
75°	8,86	5,05	7,22	5,46	4,13	4,13	4,97	5,95	4,22	6,27	6,03	8,40
90°	4,91	4,30	5,05		3,53	3,36	4,80	6,27	4,22	6,11	5,87	5,95
105°	5,95	6,59	4,64	3,79	6,03	2,55	4,22	5,38	5,46	4,30	4,72	4,88
120°	7,54	8,71	6,99	5,46		4,05	3,53	5,13	5,38	3,79		6,83
135°	8,32	9,25	7,93	5,30	3,96	4,13	3,36	4,55	5,46	4,05		7,77
150°	7,38	7,38	4,80	3,88	3,53		3,53	4,22	5,62	4,13	3,80	7,93
165°		6,19	5,05	5,13	4,88	2,92	5,13	3,44	5,62	4,38	3,96	7,54
180°		7,14	7,14	6,43	6,27	4,88		3,18	5,13	4,80	3,70	4,64
195°	3,53	7,30	7,85	7,06	6,91	6,03	4,13	4,30	4,13	4,47	3,96	5,78
210°	1,40	7,54	7,69	7,30	6,83	6,59	5,78		3,70	4,22	4,38	5,95
225°	3,27	7,69	7,69	7,14	6,59	6,67	7,06	4,38	4,38	3,44	4,88	5,62
240°	5,62	3,79	6,83	6,83	6,35	6,59	6,51	7,38		3,62	5,13	6,59
255°	6,67	5,95	4,13	6,51	6,03	6,19	5,54	7,93	4,22	2,65	4,13	7,54
270°	7,38	7,14	6,91	5,30	5,46	5,46	4,80	7,14	4,13		2,83	6,35
285°	6,27	6,59	6,67	3,62	4,97	4,97	4,38	6,27	5,05	3,18	4,64	5,95
300°	5,38	6,03	6,27	5,38	4,55	4,88	4,38	5,62	6,27	4,88		4,97
315°	5,54	6,19	6,19	5,95	3,36	4,72	4,22	5,13	6,19	4,47	5,46	6,43
330°	4,72	6,59	6,27	5,95	4,64	4,55	3,79	4,64	5,13	3,09	4,38	
345°	2,74	4,38	6,19	5,78	5,21	4,13	3,53	3,62	3,44	5,30	3,53	5,13
$\bar{\theta}_0$	6,18	6,43	6,36	5,58	5,16	4,78	4,64	5,47	5,16	4,52	4,75	6,44

(em Kg/m²)

TABELA A.20 - Tensão cisalhante na forma τ_0/τ_0 , corrida I: Re = 33000, barra central

θ	∞	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°				1,01		0,78				1,19		1,03	
15°		1,34		0,77		0,78		0,54		1,46		1,21	
30°		0,83		0,89		0,65		0,86		1,46		0,91	
45°		0,83		1,01		0,91		1,13		0,74		0,65	
60°		1,09				0,91		1,00				1,03	
75°		0,97		1,14		1,03		0,86		1,19		1,27	
90°		0,68		0,89		0,91		0,86		0,57		1,39	
105°		0,52		0,77		0,32		1,13		0,90		0,65	
120°		1,23		1,01				1,13		0,90			
135°		1,47		1,36		1,16		1,13		0,90			
150°		1,23		0,63		0,91		0,86		0,90		1,03	
165°				0,77		0,91		0,86		1,05		0,78	
180°				1,24		1,16				1,19		0,91	
195°		0,97		1,36		1,27				1,05		0,78	
210°		0,68		1,14		0,78		0,54		0,90		0,78	
225°		1,09		0,89		0,32		0,86		0,57		0,91	
240°		0,97				1,16		0,86				1,03	
255°		0,97		1,14		1,51		1,00		1,05		1,03	
270°		0,83		1,24		1,03		0,86		0,74		0,91	
285°		1,09		0,77		1,27		0,54		0,90		1,16	
300°		1,09		0,89				1,27		1,19			
315°		0,97		0,89		1,16		1,52		1,19		1,27	
330°		0,83		0,77		1,27		1,39		0,74		1,03	
345°		0,68		0,89		0,91		1,00		0,57		0,78	

TABELA A.21 - Tensão cisalhante na forma τ_0/τ_0 , corrida I: Re = 33000, barra periférica.

θ	∞	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°				1,01		0,78		0,73		0,77		1,05	
15°		1,00		0,95		0,78		0,73		0,59		0,96	
30°		0,81		0,95		0,90		1,04		0,94		0,88	
45°		1,00		0,65		1,15		1,17		1,79		0,37	
60°		1,48				1,02		1,17				1,05	
75°		1,43		0,95		0,78		1,17		0,94		1,22	
90°		0,81		0,80		0,78		1,04		1,09		0,78	
105°		1,06		0,80		1,26		1,04		1,23		1,38	
120°		1,43		1,01				0,89		1,23			
135°		1,48		1,22		0,78		0,73		1,23		1,05	
150°		1,24		0,80		0,64		0,89		1,23		0,88	
165°		1,13		0,49		0,78		1,04		0,94		1,14	
180°				1,15		0,90				0,94		0,96	
195°		0,53		1,28		1,37		0,89		0,77		0,96	
210°		0,29		1,28		1,49		1,04		0,59		0,88	
225°		0,53		1,28		1,49		1,83		0,77		1,05	
240°		0,81		1,15		1,26		1,44				1,38	
255°		0,94		0,73		1,15		1,17		0,94		1,30	
270°		1,00		1,01		0,90		0,73		0,77		1,14	
285°		0,94		1,01		0,78		0,56		0,94		0,59	
300°		0,88		1,01		0,64		0,73		1,09			
315°		0,88		1,08		0,64		0,73		1,09		0,78	
330°		0,53		1,01		1,02		0,56		0,77		0,69	
345°		0,68		0,95		0,90		0,56		0,59		0,78	

TABELA A.22 - Tensão cisalhante na forma τ_0/τ_0 , corrida IV: Re = 77000, barra central.

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°		0,98	0,92	0,73	0,77	0,76		1,29	1,31	1,42	1,20	1,07
15°	1,32	0,70	0,85	0,81	0,67	0,83	0,73	1,33	1,35	1,39	1,27	0,88
30°	0,81		0,80	0,86	0,77	0,94	0,61	1,33	1,29	0,72	0,92	0,73
45°	0,68	0,75	1,08	0,85	0,92	0,90	0,94	1,10	0,98	0,50	0,99	1,16
60°	1,07	0,90		0,83	1,01	0,86	0,82	0,71		1,13	1,22	1,34
75°	1,03	0,98	1,10	0,59	0,94	0,93	0,67	0,97	1,01	1,39	1,27	1,38
90°	0,64	0,67	0,81		0,87	0,93	0,80	1,02	0,84	1,35	1,24	1,14
105°	1,07	0,90	0,68	0,71	0,86	0,93	0,97	0,93	1,09	0,95	0,99	0,84
120°	1,34	1,24	1,15	1,17		0,70	1,01	0,80	0,90	0,84		1,11
135°	1,40	1,42	1,31	0,80	1,12	1,01	0,96	0,84	0,74	0,90		1,29
150°	1,29	1,40	0,88	0,73	0,79		0,82	0,88	0,90	0,91	0,78	1,20
165°	0,84	0,87	0,95	1,11	0,74	0,78	1,08	0,82	1,05	0,97	0,83	0,69
180°		0,98	1,34	1,35	1,06	1,01		0,57	1,09	1,06	0,78	0,91
195°	0,79	1,30	1,41	1,41	1,17	0,91	1,14	0,57	0,94	0,99	0,83	1,03
210°	0,61	1,28	1,26	1,21	0,77	0,70	0,75		0,80	0,93	0,92	1,11
225°	1,01	1,20	1,02	0,77	0,96	0,91	0,75	0,69	0,36	0,76	1,03	1,07
240°	0,89	0,60		1,17	1,33	1,21	1,01	0,92		0,80	1,08	1,00
255°	0,86	1,03	0,88	1,32	1,47	1,33	0,97	0,88	1,05	0,59	0,87	0,84
270°	0,93	1,08	1,16	1,25	1,31	1,15	0,65	0,63	0,78		0,60	0,84
285°	1,03	1,00	0,69	1,06	0,77	0,76	1,05	1,01	0,68	0,70	0,98	0,79
300°	1,00	0,89	0,88	0,70		1,16	1,41	1,52	1,16	1,08		0,79
315°	1,05	0,74	0,80	1,05	1,17	1,30	1,57	1,50	1,24	0,99	1,15	0,59
330°	0,93	0,64	0,68	1,05	1,34	1,24	1,39	1,10	0,78	0,68	0,92	
345°	0,93	0,75	0,85	0,81	0,56	0,93	1,18	0,77	1,09	1,17	0,74	0,69

TABELA A.23 - Tensão cisalhante na forma τ_0/τ_0 , corrida IV: $Re = 77000$, barra periférica

$\theta \backslash \alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
0°		0,84	0,96	0,92	0,90	0,55	0,69	0,56	0,83	1,42	1,20	0,97
15°	0,91	0,60	0,88	0,86	0,77	0,72	0,65	0,82	0,93	1,39	1,27	0,92
30°	0,71		0,96	0,87	0,83	0,79	0,93	1,20	1,29	0,72	0,98	0,67
45°	1,07	0,77	0,73	0,86	0,98	1,00	1,03	1,12	1,49	0,50	0,99	1,00
60°	1,43	0,96		0,59	0,96	1,04	1,12	1,04		1,13	1,22	1,28
75°	1,43	0,79	1,14	0,98	0,80	0,86	1,07	1,09	0,82	1,39	1,27	1,30
90°	0,80	0,67	0,79		0,68	0,70	1,03	1,15	0,82	1,35	1,24	0,92
105°	0,96	1,02	0,73	0,68	1,17	0,53	0,91	1,06	1,06	0,95	0,99	0,76
120°	1,22	1,35	1,10	0,98		0,85	0,76	0,94	1,04	0,84		1,06
135°	1,35	1,44	1,25	0,95	0,71	0,86	0,72	0,83	1,06	0,90		1,21
150°	1,19	1,15	0,75	0,70	0,68		0,76	0,77	1,09	0,91	0,78	1,23
165°		0,96	0,79	0,92	0,95	0,61	1,11	0,63	1,09	0,97	0,83	1,17
180°		1,11	1,12	1,15	1,22	1,02		0,58	0,99	1,06	0,78	0,72
195°	0,57	1,14	1,23	1,27	1,34	1,26	0,89	0,79	0,80	0,99	0,83	0,90
210°	0,23	1,17	1,21	1,31	1,32	1,38	1,25		0,72	0,93	0,92	0,92
225°	0,53	1,20	1,21	1,28	1,28	1,40	1,52	0,80	0,85	0,76	1,03	0,87
240°	0,91	0,59	1,07	1,22	1,23	1,38	1,40	1,35		0,80	1,08	1,02
255°	1,08	0,93	0,65	1,17	1,17	1,29	1,19	1,45	0,82	0,59	0,87	1,17
270°	1,19	1,11	1,09	0,95	1,06	1,14	1,03	1,31	0,80		0,60	1,05
285°	1,01	1,02	1,05	0,65	0,96	1,04	0,94	1,15	0,98	0,70	0,98	0,92
300°	0,87	0,94	0,99	0,96	0,88	1,02	0,94	1,03	1,22	1,08		0,77
315°	0,90	0,96	0,97	1,07	0,65	0,99	0,91	0,94	1,20	0,99	1,15	1,00
330°	0,76	1,02	0,99	1,07	0,90	0,95	0,82	0,85	0,99	0,68	0,92	
345°	0,44	0,68	0,97	1,04	1,01	0,86	0,76	0,66	0,67	1,17	0,74	0,80

TABELA A. 24 - Incerteza na determinação da tensão cisalhante adimensionalizada. Valores apresentados para duas situações particulares.

θ	Corrida I		Corrida IV	
	erro relativo na diferença de pressão do tubo de Preston (%)	incerteza nos valores adimensionalizados ($\sigma_v/\bar{\sigma}_0$)	erro relativo na diferença de pressão do tubo de Preston (%)	incerteza nos valores adimensionalizados ($\sigma_v/\bar{\sigma}_0$)
0°				
15°	10	0,10	4	0,04
30°	13	0,10	4	0,03
45°	10	0,10	3	0,03
60°	7	0,10	3	0,04
75°	7	0,10	3	0,04
90°	13	0,10	4	0,03
105°	10	0,11	4	0,04
120°	7	0,10	3	0,04
135°	7	0,10	3	0,04
150°	8	0,10	3	0,04
165°	9	0,10		
180°				
195°	22	0,12	5	0,03
210°	52	0,15	15	0,03
225°	22	0,12	5	0,04
240°	13	0,10	4	0,04
255°	11	0,10	3	0,03
270°	10	0,10	3	0,04
285°	11	0,10	4	0,04
300°	12	0,11	4	0,03
315°	12	0,11	4	0,04
330°	22	0,12	4	0,03
345°	16	0,11	6	0,03

APÊNDICE B - TUBO DE PRESTON

Próximo a uma parede lisa a viscosidade molecular tem uma influência dominante na formação do perfil de velocidade. A lei da parede supõe que a relação entre o esforço cisalhante na parede e a velocidade $u(y)$ a uma distância y da parede, depende somente da viscosidade (μ) e da densidade (ρ) do fluido. Expressa de forma adimensional, a relação funcional é: (10) (11)

$$\frac{u}{u^*} = F \left[\frac{u^* y}{\nu} \right] \quad \text{B.1}$$

onde $u^* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ (velocidade de atrito local) e $u = u(y)$. Na sub-camada laminar o gradiente de velocidade ($\partial u/\partial y$) é quase constante, quando considera-se as condições para a existência de um perfil universal, podendo-se, então, supor que o esforço tangencial é constante e igual a tensão cisalhante na parede (τ_0), dada pela seguinte expressão:

$$\tau_0 = \tau_0 = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = \mu \frac{u}{y} \quad \text{B.2}$$

e a equação B.1 pode ser escrita na forma

$$\frac{u}{u^*} = \frac{u^* y}{\nu} \quad \text{B.3}$$

Da equação B.2 pode-se deduzir que obtido o valor da velocidade $u(y)$ e sua posição y , na subcamada laminar, dentro das condições impostas, fica determinada a tensão cisalhante na parede τ_0 .

Colocando-se um tubo de Pitot junto da parede (usualmente redefinido como tubo de Preston), de tal forma que a pressão de estagnação corresponda a um ponto da subcamada laminar, e co-

nhecido o diâmetro do tubo (a), fica determinada experimentalmente a tensão τ_0 .

Patel (13) montou a curva de calibração que determina a função F da relação B.1, para um tubo circular, com escoamento totalmente desenvolvido. Em seu trabalho é apresentada a relação funcional entre a leitura do tubo de Preston e a tensão cisalhante na parede, dada por:

$$\frac{\tau_0 a^2}{4 \rho v^2} = F \left[\frac{\Delta p_p a^2}{4 \rho v^2} \right] \quad (\text{B.4})$$

onde Δp_p é a leitura do tubo de Preston e a o diâmetro desse mesmo tubo. A relação F é reproduzida no gráfico da figura B.1

Essas curvas são representadas pelas seguintes equações:

$$y^* \equiv \frac{1}{2} x^* + 0,037 \quad \rightarrow \quad 0 < x^* < 2,9 \quad (\text{B.5})$$

$$y^* = 0,8287 - 0,1381x^* + 0,143x^{*2} - 0,0060x^{*3} \quad \rightarrow \quad 2,9 < x^* < 5,6 \quad (\text{B.6})$$

$$y^* + 2 \log_{10} (1,95 y^* + 4,10) = x^* \quad \rightarrow \quad 5,6 < x^* < 7,6 \quad (\text{B.7})$$

$$\text{onde: } y^* = \log_{10} \left[\frac{\tau_0 a^2}{4 \rho v^2} \right] \quad (\text{B.8})$$

$$x^* = \log_{10} \left[\frac{\Delta p_p a^2}{4 \rho v^2} \right] \quad (\text{B.9})$$

Desta forma, utilizando-se estas curvas de calibração, é transformada a leitura do tubo de Preston em tensão cisalhante local.

Figura B.1 - Calibração do tubo de Preston, curva retirada da referência 13

7	plaqueta	6	aco
6	perfil "C" 1 1/2" x 1/4"	1	aco
5	perfil "C" 1 1/2" x 1/4"	1	aco
4	perfil "C" 1 1/2" x 1/4"	1	aco
3	perfil "C" 1 1/2" x 1/4"	1	aco
2	perfil "C" 1 1/2" x 1/4"	1	aco
1	flange	1	aco
N	Detonificação	Quant	material
			Norma

Escala 1:5
Suporte de sustentação das bar
ras da seção de teste
detalhes e solda

Figura C 2a
Data 04/78

6	parafuso allen	M3 x 7	aco	
5	parafuso allen	M5 x 10	aco	
4	pino de rotaçao		aco	
3	pino de sustentação		aco	
2	helicoidal		Cobre eletro	
1	tubo sem costura		aco	
Nº	Denominação	Quant	Material	Norm.
Escala	Montagem de uma das barras	Figura	Data	
1:7,5	simples	C 3	02/06	

cotas em mm

corte A-A'

7	cordão Parker W 2.62 2xxx	4	borracha	
6	porca M10	32	bronze	
5	eixo rosqueado M 10	16	alumínio	
4	canaleta em "V"	2	madeira	
3	placa	2	madeira	
2	placa	2	acrílico	
1	flange	1	alumínio	
Nº	Denominação	Quant	Material	Norma
Escala		Figura		Data
1:100		C5		01/06
Montagem do duto hexagonal		da seção de testes		

cotas em mm.

cotas em mm.

4	canaleta em V	2	madeira	
3	placa	2	madeira	
2	placa	2	acrilico	
1	flange	1	alumínio	
Nº	Denominação	Quantidade	Material	Norm.
Escala	Montagem do duto hexagonal	Figura	C5a	01/06
1:10	da seção de testes

9	cabeca de agulha hipodérmica	17	inox	
8	manete	1	latão	
7	"O" ring Parker 1.76 2xxx	1	borracha	
6	"O" ring Parker 1.76 2xxx	1	"	
5	"O" ring Parker 1.76 2xxx	1	"	
4	porca leve M20	1	latão	
3	parafuso de fixacao M20	1	latão	
2	placa móvel	1	acrílico	
1	placa fixa	1	acrílico	
Nº	Denominação	Quant	Material	Norma
Escala		Figura		Data
1:2		C6		09/79
Comutador de pressão				

cotas em mm

3	parafuso de fixação	1	latão	
2	placa móvel	1	acrílico	
1	placa fixa	1	acrílico	
Nº	Denominação	Quant	Material	Norm

cotas em num

cotas em mm

1	disco graduado	1	acrilico	
N°	Descrição	Quant	Material	Norma
Escala	Transferidor para medida do	Figura	Data	
1:2	ângulo α	C 7	11/06

cotas em mm

6	cabeça de agulha hipodérmica	2	aço inox	
5	"O" ring Parker 1.78 2xxx	1	borracha	
4	vedador	1	latão	
3	tampão	1	"	
2	posicionador	1	"	
1	tubo de pitot	1	aço inox	
Nº	Denominação	Quant	Material	Norm.
Escala	Tubo de pitot	Figura	Data	
1:1		C8	08/78

cotas em mm

3

6

4

N°	Denominação	Quant	Material	Norma
6	guia	1	acrilico	
5	flange fixadora	1	latão	
4	porca leve M12	6	"	
3	parafuso	3	"	
2	flange	1	acrilico	
1	base	1	"	
Escala				
1:2	Sistema de posicionamento do tubo de Pitot	Figura C 9	Data 09/06

①

②

③

①

②

③

* cotas em mm

3	fixador	1	latão	
2	agulha hipodérmica - tubo de Preston	1	aço inox	
1	adaptador	1	aço	
Nº	Descrição	Quant	Material	Norma
Escala 1:1	Montagem do tubo de Preston	Figura C10	Data 09/06	