PUC

LUIZ GUSTAVO DA CRUZ DUARTE

TRANSFERÊNCIA DE MASSA PARA JATOS
ESPIRALADOS E INCIDENTES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Rio de Janeiro, 29 de Abril de 1994

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO
RUA MARQUÊS DE SÃO VICENTE, 225 — CEP 22453
RIO DE JANEIRO — BRASIL

LUIZ GUSTAVO DA CRUZ DUARTE

***TRANSFERÊNCIA DE MASSA PARA JATOS
ESPIRALADOS E INCIDENTES***

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

Orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO**

Rio de Janeiro, 29 de Abril de 1994

À meus pais

AGRADECIMENTOS

Ao professor Luis Fernando Alzuguir Azevedo, pela paciência, compreensão e excelente orientação cedida a este trabalho.

À minha família, pelo constante estímulo e dedicação.

À minha noiva, pela compreensão e apoio nos momentos mais difíceis.

Aos colegas Gerson Chada e Alexandre Binato, por terem me convencido a terminar este trabalho.

Aos amigos Pedro Faveret e Ênio Menengoy, por todas as dicas, ensinamentos e principalmente pelo enorme sentimento de amizade surgido entre nós.

Ao funcionário Severino, responsável por toda a parte eletrônica do experimento.

Ao funcionário Jandir da Cunha, pela elaboração da bancada experimental. Aos funcionários Lourenço Ribeiro e Leninaldo da Silva, pela colaboração recebida ao longo deste trabalho.

Ao aluno Paulo Petrassi, por ter iniciado a elaboração da bancada experimental.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RJ, pela confiança que permitiu a realização deste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

RESUMO

O presente trabalho é um estudo experimental das características de troca de calor e massa de um jato de ar incidindo ortogonalmente sobre uma placa. O estudo tem por objetivo avaliar a influência nos coeficientes de troca da presença de um componente circunferencial na velocidade do jato. Durante os experimentos foram investigadas a influência do número de Reynolds do jato, da distância jato/placa e da intensidade do escoamento espiralado (número de swirl).

Os coeficientes de troca foram determinados utilizando-se a técnica de sublimação de naftaleno em conjunto com a analogia entre os processos de transferência de calor e massa. Coeficientes de troca de massa locais foram determinados utilizando-se uma mesa de coordenadas computadorizada especialmente construída, que permitiu a obtenção de medidas detalhadas tanto na região de estagnação do jato quanto na região mais externa. Coeficientes globais de troca de massa foram obtidos independentemente dos locais através de pesagem.

Os resultados demonstraram uma diminuição nos coeficientes de troca de massa do jato com o aumento da intensidade do escoamento espiralado.

Visualizações do escoamento junto à placa foram realizadas, utilizando-se a técnica de óleo com negro de fumo. Os resultados das visualizações demonstraram a existência de regiões de separação junto à fronteira da zona de estagnação. Para altos valores do número de swirl foram verificadas fortes reversões do escoamento na região de estagnação.

ABSTRACT

The present work is an experimental study of the mass transfer characteristics of a swirling jet impinging on a flat plate. The main objective of the investigation was to determine the influence of a circumferential velocity component (the swirl component) on the local and average mass transfer coefficients at the plate surface. The dimensionless parameters investigated were the jet Reynolds number, the jet-to-plate distance, and the strength of the swirl flow given by the swirl number.

Mass transfer coefficients were obtained utilizing the naphthalene sublimation technique. The local coefficients were determined employing a computerized coordinate table which allowed a detailed study of the effects of the presence of the swirl component. Average coefficients were determined independently through precision weighing, and displayed excellent agreement with the integrated local coefficients.

The results demonstrated that the presence of the swirl component decreases the mass transfer coefficients, when compared with the non-swirl case.

Flow visualization experiments were conducted utilizing the oil-lamp black technique. The results revealed regions of reverse flow at the stagnation zone for high values of the swirl number.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
NOMENCLATURA	x
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	04
2.1 - Seção Geradora de Escoamento Espiralado	05
2.2 - Câmara Reguladora de Escoamento Espiralado	07
2.3 - Câmara de Testes	08
2.3.1 - Transferência de Massa	08
2.3.2 - Medida do Número de Swirl	18
2.4 - Outros Componentes	25
2.4.1 - Base para Fundição do Cassete	25
2.4.2 - Funil de Enchimento e Respiros	26
2.4.3 - Tubos	28
2.4.4 - Luneta	28
2.4.5 - Válvulas	29
2.4.6 - Exaustor	29
2.5 - Instrumentação	30
2.5.1 - Medida de Tempo	30
2.5.2 - Medida de Pressão	30
2.5.3 - Medida de Massa	30
2.5.4 - Medida de Temperatura	31
2.5.5 - Sistema Automático de Aquisição de Dados	32

3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1 - Determinação do Número de Swirl	35
3.2 - Calibração do Fio de Aço	37
3.3 - Preparação para as Medidas de Transferência de Massa	38
3.3.1 - Destilação do Naftaleno	38
3.3.2 - Fundição do Naftaleno no Cassete Circular	40
3.4 - Ajuste dos Parâmetros do Experimento	43
3.5 - Medidas de Transferência de Massa	43
4 - TRATAMENTO DOS DADOS	48
4.1 - Calibração do Fio de Aço do Medidor de Swirl	48
4.2 - Determinação do Número de Swirl	49
4.3 - Equação do Plano de Referência	50
4.4 - Coeficientes Médios de Troca de Massa	51
4.5 - Coeficientes Locais de Troca de Massa	54
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 - Resultados do Número de Swirl	56
5.1.1 - Ângulo de Giro do Cilindro de Nylon	56
5.1.2 - Curvas de Calibração	58
5.1.3 - Determinação do Número de Swirl	60
5.2 - Resultados de Transferência de Massa	63
5.2.1 - Caso Base - Jato não Espiralado	63
5.2.2 - Resultados para Jatos Espiralados	68
6 - CONCLUSÕES	81

APÊNDICES

I - Cálculo da Vazão de Ar 84

II - Propriedades e Constantes 88

III - Análise de Incertezas 90

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Vista Esquemática da Seção de Testes	06
Figura 2.2 - Câmara Geradora de Escoamento Espiralado	09
Figura 2.3 - Câmara Reguladora de Escoamento Espiralado	10
Figura 2.4 - Câmara de Testes	11
Figura 2.5 - Câmara de Testes	14
Figura 2.6 - Disco de Nivelamento e Alinhamento do Cassete	15
Figura 2.7 - Peça Centralizadora	16
Figura 2.8 - Placa Acrílica	17
Figura 2.9 - Cassete Circular	18
Figura 2.10- Seção de Testes - Número de Swirl	20
Figura 2.11- Cilindro de Nylon	21
Figura 2.12- Sistema de Fixação do Fio de Aço	22
Figura 2.13- Dispositivo de Fixação do Fio de Aço	23
Figura 2.14- Buchas do Cilindro de Nylon	23
Figura 2.15- Dispositivo de Calibração do Fio de Aço	25
Figura 2.16- Base para Fundição do Cassete Circular	26
Figura 2.17- Funil de Enchimento e Respiros	27
Figura 2.18- Ligação do Termopar	32
Figura 2.19- Sistema Automático de Aquisição de Dados	34
Figura 2.20- Mesa de Coordenadas	34
Figura 3.1 - Dispositivo para Fundição e Destilação	39
Figura 3.2 - Esquema para Fundição	42
Figura 3.3 - Malha com 4 Diâmetros	46
Figura 3.4 - Demonstração da Simetria no Cassete	46
Figura 3.5 - Malha Utilizada	47

Figura 5.1 - Ângulo de Giro - Tubo 9.0mm	57
Figura 5.2 - Ângulo de Giro - Tubo 13.2mm	57
Figura 5.3 - Ângulo de Giro - Tubo 22.0mm	58
Figura 5.4 - Curva de Calibração para o Fio de Aço de 0.2mm de Diâmetro	59
Figura 5.5 - Curva de Calibração para o Fio de Aço de 0.3mm de Diâmetro	59
Figura 5.6 - Número de Swirl x Reynolds do Jato - Tubo 9.0mm	61
Figura 5.7 - Número de Swirl x Reynolds do Jato - Tubo 13.2mm	61
Figura 5.8 - Número de Swirl x Reynolds do Jato - Tubo 22.0mm	62
Figura 5.9 - Distribuição Radial de Sherwood Local para $H/Dt = 2$	65
Figura 5.10- Distribuição Radial de Sherwood Local para $H/Dt = 4$	65
Figura 5.11- Distribuição Radial de Sherwood Local para $H/Dt = 8$	66
Figura 5.12- Comparação entre os Valores de Sherwood Médio - $H/Dt = 2$	67
Figura 5.13- Comparação entre os Valores de Sherwood Médio - $H/Dt = 4$	67
Figura 5.14- Comparação entre os Valores de Sherwood Médio - $H/Dt = 8$	68
Figura 5.15- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 9000$, $H/Dt = 2$	70
Figura 5.16- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 9000$, $H/Dt = 4$	70
Figura 5.17- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 9000$, $H/Dt = 8$	71
Figura 5.18- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 18000$, $H/Dt = 2$	73
Figura 5.19- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 18000$, $H/Dt = 4$	74
Figura 5.20- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 18000$, $H/Dt = 8$	74
Figura 5.21- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 27000$, $H/Dt = 2$	75
Figura 5.22- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 27000$, $H/Dt = 4$	75
Figura 5.23- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 27000$, $H/Dt = 8$	76
Figura 5.24- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 36000$, $H/Dt = 2$	76
Figura 5.25- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 36000$, $H/Dt = 4$	77
Figura 5.26- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 36000$, $H/Dt = 8$	77
Figura 5.27- Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 45000$, $H/Dt = 2$	78

Figura 5.28 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 45000$, $H/Dt = 4$	78
Figura 5.29 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 45000$, $H/Dt = 8$	79
Figura 5.30 - Sherwood Local Médio x Número de Reynolds, $H/Dt = 2$	80
Figura 5.31 - Sherwood Local Médio x Número de Reynolds, $H/Dt = 4$	80
Figura 5.32 - Sherwood Local Médio x Número de Reynolds, $H/Dt = 8$	81
Figura A1.1- Instalação e Posicionamento da Placa de Orifício	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Valores Característicos do Número de Swirl	62
Tabela A1.1 - Placas de Orifício Utilizadas	84
Tabela A3.1 - Incerteza das Variáveis	91
Tabela A3.2 - Incerteza no Coeficiente de Descarga da Placa de Orifício	91
Tabela A3.3 - Incerteza do Número de Reynolds	93
Tabela A3.4 - Incerteza de Sherwood Médio	95
Tabela A3.5 - Incerteza de Sherwood Local Médio	97
Tabela A3.6 - Incerteza de Sherwood Local, $Re = 45000$, $H/Dt = 4$, $S = 0$	99
Tabela A3.7 - Incerteza de Sherwood Local, $Re = 45000$, $H/Dt = 2$, $S = 0.54$	102

NOMENCLATURA

A_{cl}	Área da célula
A_c	Área do cassete
A_d	Área de escoamento do orifício
d	Diâmetro do furo da placa de orifício
d_t	Diâmetro da tubulação da placa de orifício
D_t	Diâmetro do jato
$D_{n/ar}$	Coefficiente de difusão do naftaleno no ar
F_a	Fator de expansão de área
G_x	Quantidade de movimento linear
G_ϕ	Quantidade de movimento angular
H	Distância jato/placa ou distância jato/cilindro de nylon
k	Coefficiente médio de transferência de massa
$k_{(j)}$	Coefficiente local de transferência de massa
K	Coefficiente de descarga
ℓ	Dimensão característica
L	Posição da câmara geradora dentro da câmara reguladora
$\dot{m}$	Fluxo total de massa
$\dot{m}_{n(i)}$	Taxa local de transferência de massa
$\dot{M}$	Taxa de transferência de massa
M_{ar}	Massa molecular do ar
$\dot{M}_n$	Fluxo total de massa de naftaleno
M_n	Massa molecular do naftaleno
ΔM_n	Massa sublimada de naftaleno corrigida
Nu	Número de Nusselt
p	Pressão

P_{atm}	Pressão atmosférica
p_{vp}	Pressão de vapor do naftaleno
Pr	Número de Prandtl
p_1	Pressão a montante da placa de orifício
p_2	Pressão a jusante da placa de orifício
Δp	Queda de pressão no orifício ($p_1 - p_2$)
r	Coordenada radial
R	Constante universal dos gases
R	Raio do jato (na equação 4.8)
Re	Número de Reynolds
S	Número de Swirl
Sc	Número de Schmidt
Sh	Número de Sherwood
Sh_l	Número de Sherwood local
Sh_m	Número de Sherwood médio
Sh_{lm}	Número de Sherwood local médio
$Sh_{m_{cb}}$	Número de Sherwood médio para o caso base
$Sh_{lm_{cb}}$	Número de Sherwood local médio para o caso base
T	Temperatura
T_{ar}	Temperatura do ar do laboratório
T_p	Temperatura da parede do naftaleno
u	Componente axial da velocidade
V	Força eletromotriz
$\bar{V}$	Velocidade média
w	componente circunferencial da velocidade
$\dot{W}$	Fluxo de massa
ΔY	Profundidade sublimada

Letras Gregas

β	Relação de diâmetros da placa de orifício
δ	Incerteza experimental de uma variável
γ	Razão entre calores específicos
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Massa específica
$\rho_{n(i)}$	Concentração de mistura de vapor de naftaleno
ρ_{np}	Concentração de vapor de naftaleno na parede
$\Delta\rho_n$	Diferença de concentração de vapor de naftaleno (medidas globais)
$\Delta\rho_{n(j)}$	Diferença de concentração de vapor de naftaleno (medidas locais)
θ	Ângulo de Giro
τ	Tempo de duração das corridas

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

Jatos incidindo sobre superfícies produzem as mais altas taxas de transferência de calor ou massa que podem ser obtidas em escoamentos monofásicos e, por esta razão, são largamente empregados na indústria. O uso de jatos no aquecimento, resfriamento ou secagem é encontrado em várias aplicações, dentre as quais destacam-se a secagem de papel e tecido, a têmpera de vidro, o aquecimento e resfriamento de metais, o resfriamento de palhetas de turbinas e de componentes eletrônicos.

Uma revisão da literatura relacionada com jatos incidentes revela um grande número de trabalhos investigando vários aspectos desta configuração. Os resultados destes trabalhos de pesquisa estão resumidos nos artigos de revisão publicados por Martin [04] e Downs e James [23]. Os trabalhos citados incluem descrições dos diversos parâmetros que influenciam a troca de calor ou massa para jatos. Estes parâmetros incluem os efeitos geométricos tais como espaçamento e diâmetro do jato, forma da seção reta do jato, número de Reynolds, intensidade de turbulência, efeitos de temperatura, ângulo de incidência do jato e curvatura da superfície. Também foram investigadas na literatura as características de transferência de calor e massa de conjuntos de jatos incidentes e a influência da forma com que o fluido utilizado é descartado.

Mais recentemente os trabalhos publicados na literatura indicam um crescente interesse no estudo de jatos incidentes de líquido. Stevens e Webb [11,22,30] estudaram troca de calor para jatos de líquido com ênfase na estrutura da superfície livre e dos efeitos causados pela inclinação do jato. Zumbrunnen e Aziz [24] investigaram a troca de calor para jatos intermitentes de líquido, enquanto Liu, Gabour e Lienhard [25] incluíam efeitos de tensão superficial.

As aplicações de resfriamento de componentes eletrônicos com altas taxas de geração de calor têm motivado estudos de jatos ou conjuntos de jatos de líquido incidindo em pequenas superfícies aquecidas. [26,27].

Jatos incidentes sem superfícies livres continuaram a ser investigados recentemente, como indicam os trabalhos de Besserman, Ramadhyani e Incropera [32], Lytle e Weeb [31] e Azevedo, Webb e Queiroz [28].

Apesar do grande número de publicações relacionadas com jatos incidentes, os efeitos da presença de um componente circunferencial no jato foram pouco explorados. Estes jatos espiralados encontram grande aplicação em combustores, onde o componente circunferencial da velocidade é introduzido com o objetivo de homogeneizar a mistura e estabilizar a chama. Em muitas aplicações jatos provenientes de combustores são utilizados diretamente no aquecimento de chapas para tratamento térmico. A previsão da troca de calor para este tipo de jato necessita de informações sobre a influência do escoamento espiralado nos coeficientes médios e locais de troca.

Martin [04] em seu extenso trabalho de revisão menciona, sem apresentar dados numéricos, que a presença do componente circunferencial da velocidade em um jato incidente não produz alterações significativas na troca de calor ou massa. Ward e Mahmood [03], no entanto, apresentam conclusões opostas à de Martin, indicando que a presença do escoamento espiralado reduz significativamente a troca de calor ou massa. Este trabalho é bastante limitado, apresentando resultados de troca de calor local para apenas um valor do número de Reynolds. É apresentada também uma correlação para o número de Nusselt médio em função da distância adimensional do jato à placa, do número de Prandtl, do número de Reynolds e da intensidade do escoamento espiralado dada pelo número de Swirl. A acurácia desta correlação deve ser verificada, visto que foi construída com dados de apenas 2 valores do número de Reynolds.

O objetivo do presente trabalho é apresentar dados detalhados sobre as características de transferência de massa da configuração formada por um jato de ar

espiralado incidindo ortogonalmente sobre uma placa plana. Estes resultados além de esclarecerem as divergências entre os trabalhos de Martin [04] e Ward e Mahmood [03], fornecem informações locais e médias sobre esta configuração não disponíveis até o presente.

Nos capítulos que se seguem é apresentada uma descrição detalhada da bancada e procedimentos experimentais utilizados na realização dos experimentos, bem como uma análise dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 02

DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A finalidade deste trabalho é a determinação de coeficientes de troca de massa para um escoamento de jato espiralado, e a sua posterior comparação com os coeficientes para o mesmo escoamento utilizando jatos não espiralados.

É do nosso conhecimento que a determinação de coeficientes locais de troca de calor para a condição de contorno de temperatura da parede constante é de difícil obtenção, pois não se consegue determinar com boa precisão os fluxos locais de transferência de calor. Além disso, a simples obtenção de uma condição de temperatura constante na superfície é uma tarefa de difícil consecução experimental. Por esta razão, tornou-se conveniente optar pela técnica de sublimação de naftaleno em conjunto com a analogia entre os processos de transferência de calor e massa na determinação dos coeficientes [01].

Nesta técnica a superfície aquecida é substituída por uma placa de naftaleno que é exposta ao escoamento a ser estudado. O conhecimento da massa de naftaleno sublimada para o ar permite a determinação dos coeficientes de troca de massa.

Uma das grandes vantagens desta técnica sobre um experimento de transferência de calor é a possibilidade de determinação da distribuição dos coeficientes locais de troca de massa com alta resolução espacial. Como será descrito a seguir, no presente trabalho utilizou-se um sistema automatizado para a determinação destes coeficientes locais, o que permitiu uma avaliação detalhada das características de troca de massa de um jato espiralado incidindo sobre uma placa.

Para a obtenção de resultados confiáveis com a técnica de sublimação de naftaleno é necessário que o experimento seja realizado com temperatura constante. Por esta razão, foi necessário construir uma seção de testes que permitisse a formação de um jato incidente proveniente de um ambiente com temperatura constante. Isto foi obtido com a seção de testes descrita a seguir onde o jato é produzido por sucção do ar ambiente. A Figura 2.1 mostra uma vista de todos os equipamentos utilizados.

Um aspirador posicionado externamente à sala do laboratório, succionava ar a uma temperatura controlada por um sistema de ar condicionado para o interior da seção de testes. O ar passava através de uma seção geradora de escoamento espiralado, por uma seção reguladora do escoamento espiralado e pelo tubo que simulava um jato. A saída deste jato encontrava-se no interior de uma câmara plena, incidindo ortogonalmente sobre uma placa circular de naftaleno, formando a configuração a ser estudada. Após incidir sobre a placa, o ar com vapor de naftaleno era conduzido para o exterior do laboratório, por meio de uma tubulação que continha um medidor de vazão de placa de orifício, uma válvula de fecho rápido e uma válvula de controle. A seguir será apresentada uma descrição detalhada dos componentes da seção de testes.

2.1 - Seção Geradora de Escoamento Espiralado

Dentre as várias maneiras de se obter o escoamento espiralado, optou-se por fazê-lo através de uma câmara cilíndrica com furos tangenciais à circunferência interna da mesma.

A escolha deste tipo de seção deveu-se ao fato de que ela possibilitaria uma maior variação dos parâmetros estudados, e era a que melhor se adequava à seção de testes já existente. Esta seção é semelhante à usada por Chaboki [02].

Esta seção, que é mostrada na Figura 2.2, constava de um tubo de bronze TM 23, com 135 mm de comprimento, 49.6 mm de diâmetro interno e 70 mm de diâmetro externo. Uma das extremidades desta câmara era tamponada por um disco cilíndrico de alumínio, enquanto que a outra era ligada a um disco de acrílico que possibilita a fixação da mesma numa câmara reguladora de escoamento espiralado. A câmara geradora de escoamento espiralado, como pode ser visto pela Figura 2.2-b, possuía furos tangenciais à circunferência interna da mesma. Como uma das extremidades era fechada, quando o ar era succionado pela outra extremidade, ele era obrigado a entrar na câmara através destes furos tangenciais, impondo um componente circunferencial ao escoamento. Este escoamento propagava-se através da câmara, e a vazão e o diâmetro dos furos ditam a sua intensidade, bem como a disposição e o número de furos.

Figura 2.1 - Vista Esquemática da Seção de Testes

No nosso caso foram feitos 100 furos dispostos em 4 fileiras de 25 furos, que ficam a 90 graus uma das outras. Os furos tem 2mm de diâmetro, e para evitar uma possível interferência ou defeitos de usinabilidade, tomou-se o cuidado de efetuar os furos um pouco para dentro da linha tangente à circunferência interna da câmara.

Na extremidade que não era tamponada, acoplou-se um disco de acrílico com um furo central de mesmo diâmetro interno da câmara. Isto permitia que o escoamento gerado no interior da câmara não fosse perturbado antes de entrar na câmara que iria regular a intensidade do escoamento espiralado. Este disco de 141 mm de diâmetro externo e 13mm de espessura, possuía na sua parte externa um rasgo, conforme mostrado na Figura 2.2-a, que servia para acondicionar um anel de vedação de borracha com o objetivo de vedação entre a câmara descrita acima e a câmara reguladora de escoamento espiralado. A fixação do disco de acrílico na câmara foi feita por meio de três parafusos, enquanto que o pequeno disco de alumínio que tampa a parte superior da câmara, foi simplesmente colado à câmara com araldite.

2.2 - Câmara Reguladora de Escoamento Espiralado

Esta câmara era composta por um cilindro de acrílico de 372 mm de comprimento de modo que em uma de suas extremidades podia ser encaixado o disco de acrílico citado no item anterior e conforme pode-se ver na Figura 2.3-a. Como o próprio nome diz a finalidade desta câmara era possibilitar a variação da intensidade do escoamento espiralado. Isto era conseguido movendo-se a câmara geradora de escoamento espiralado dentro da câmara reguladora. Com este movimento conseguia-se uma maior ou menor intensidade do escoamento espiralado que saía desta câmara, já que quando a câmara geradora de escoamento espiralado estava na parte superior da câmara reguladora criava-se um espaço até a entrada do tubo que estava fixado na parte inferior da câmara reguladora, o que possibilitava o decaimento do escoamento espiralado. Quando o contrário ocorria, ou seja, a câmara geradora encontrava-se na parte inferior, não existia espaço para o decaimento do escoamento, e a sua intensidade era bem maior do que no caso antes citado. Uma escala

graduada foi fixada do lado de fora da câmara reguladora possibilitando que a câmara geradora fosse colocada em posições intermediárias, o que aumentava o número de opções para a intensidade do escoamento espiralado.

Segundo relatado acima, esta câmara possuía um tubo fixado na sua parte inferior. Como pode ser visto pela Figura 2.3-a, isto era feito mediante um disco de acrílico que era encaixado firmemente na câmara reguladora e que possuía um furo central onde o tubo era fixado. Já que tínhamos tubos de diferentes diâmetros, e visando facilitar a montagem e desmontagem dos mesmos, eles foram soldados individualmente em uma peça de latão que permitia a fixação dos mesmos no disco citado com a ajuda de três parafusos, como mostra a Figura 2.3-b.

2.3 - Câmara de Testes

2.3.1 - Transferência de Massa

A câmara de Testes era formada por um tambor do tipo usado em armazenamento de óleos combustíveis, mais conhecido como tambor de lixo, montado na posição vertical. As dimensões deste tambor foram escolhidas de modo a oferecer um ambiente de grandes dimensões quando comparado com a placa de naftaleno, simulando um ambiente infinito.

Pela Figura 2.4 vê-se que a mesma possuía uma janela lateral que era utilizada para manusear os objetos pertencentes ao experimento que encontram-se no seu interior, bem como para eventuais nivelamentos entre os vários componentes. Esta janela era fechada com uma placa de acrílico que possuía uma borracha de vedação na sua borda, e que após ser encaixada em parafusos já existentes no tambor era fixada com porcas do tipo borboleta.

Na parte superior, o tambor era provido de um encaixe para os tubos que resume-se a uma luva soldada a um flange. Este flange era fixado no tambor por meio de 6 parafusos, e entre eles era colocada uma junta de vedação para evitar que o ar succionado pudesse passar para o interior do tambor através desta união.

Figura 2.2 - Câmara Geradora de Escoamento Espiralado

Figura 2.3 - Câmara Reguladora de Escoamento Espiralado

Figura 2.4 - Câmara de Testes

O tambor possuía também na sua parte superior, dois orifícios por onde passavam o fio de alimentação da lâmpada que ilumina o interior do tambor, e um pequeno tubo de plástico que servia para medir a pressão no interior do mesmo por meio de um manômetro de tubo em U. Cuidados com a vedação também foram tomados nestes pontos com a utilização de massa de calafetar.

Lateralmente o tambor tinha um pequeno furo de 2mm de diâmetro, por onde passavam os fios dos termopares que monitoravam a temperatura do cassete circular que continha o naftaleno, e que ficava no interior da câmara de testes. Aqui também utilizou-se massa de calafetar para se garantir uma vedação confiável.

Na parte inferior desta câmara encontrava-se a tubulação de sucção de ar. Um cilindro de nylon colocado internamente ao tambor, ao mesmo tempo que fixava esta tubulação, possuía no seu centro um tubo de aço onde posteriormente seria encaixada uma haste, que sustentaria uma placa acrílica, que continha o cassete circular de naftaleno, conforme mostra a Figura 2.5.

Também na parte inferior do tambor eram encontrados os pés de sustentação, que constavam de três hastes de seção quadrada de madeira. A utilização de três pés de sustentação vem do conhecimento da geometria espacial, que nos diz que três pontos no espaço formam um plano e este plano é único, e isto colabora com a nossa necessidade de estabilidade de nivelamento.

Como o tambor tinha um ressalto na sua periferia, tanto na parte superior como na parte inferior, acoplou-se um disco de madeira na sua parte inferior que ajudou tanto a fixação dos pés quanto a fixação do cilindro de nylon anteriormente citado.

Os três pés foram simetricamente presos a esta tampa de madeira por meio de pregos na sua parte superior, e chapas de aço presas na sua parte inferior por meio de parafusos e porcas mantinham a rigidez do sistema de sustentação.

Na Figura 2.4 pode-se ver uma cantoneira que foi fixada em cada um dos três pés de fixação com a intenção de nivelar o tambor. Girando o parafuso que atravessa esta cantoneira e com a ajuda de um nível colocado na parte superior do tambor, podia-se por tentativas conseguir um nivelamento satisfatório para a seção de testes.

Foi citada a existência de uma haste de aço que ficava presa no cilindro de nylon que é vista na Figura 2.5. Uma barra de aço com diâmetro externo aproximadamente igual ao diâmetro interno desta haste ajustava-se perfeitamente na mesma. Um furo lateral com rosca na haste, permitia que um parafuso fixasse a barra que corria dentro da haste.

Esta barra deveria movimentar-se para cima ou para baixo conforme fosse necessário se ajustar a distância entre a saída do jato e a superfície do cassete circular.

Na outra extremidade livre desta barra era fixado conforme a Figura 2.6-a, um pequeno disco de aço que tinha por objetivo nivelar o cassete circular e centralizar o jato com este disco. Nota-se que esta placa possuía três parafusos com a ponta em forma de cone que se encaixavam numa única posição a uma placa acrílica que acondicionava o cassete circular.

Novamente com a ajuda de um nível e com o giro alternado destes parafusos era possível nivelar o cassete circular. Este nivelamento se tornava necessário para corrigir possíveis imperfeições da estrutura e do nivelamento do tambor.

Da Figura 2.6 vê-se que este disco de aço era fixado à barra de aço por meio de um parafuso que atravessava o seu centro onde existia um pequeno rasgo. Após as operações de nivelamento este parafuso era ligeiramente solto, o que permitia que o disco de aço girasse e se movimentasse ao longo do rasgo, possibilitando a centragem do tubo.

Para se garantir esta centragem, foi produzida uma peça auxiliar, mostrada na Figura 2.7, que era um disco de mesmo diâmetro externo que os cassetes circulares, e que possuía no seu centro uma luva com um furo de diâmetro tal, que o tubo que simula o jato só passava por ela de maneira bastante justa. Então como já foi dito, movimentando-se o disco de aço mostrado na Figura 2.6-b e utilizando-se esta peça, podia-se conseguir uma perfeita centragem entre o tubo e o cassete circular.

Deve-se observar que uma vez feita esta operação para um dos tubos, a não ser que ocorresse algum imprevisto, a centragem para os outros tubos estava garantida. Levando-se também em conta que uma pequena inclinação do tubo com relação ao cassete circular não afetava significativamente os coeficientes calculados, então este procedimento foi adotado de forma satisfatória.

Figura 2.6 - Disco de Nivelamento e Alinhamento do Cassete

Na Figura 2.8 é mostrada uma placa acrílica onde era fixado o cassete circular contendo o naftaleno. Também na Figura 2.8 verifica-se a existência de três parafusos que serviam para nivelar a face do cassete circular com a face superior desta placa de acrílico. Isto aumentava ainda mais a hipótese de que trabalhávamos com uma placa infinita. Um furo não centrado servia para a passagem do conector do fio de termopar que saía da parte de baixo do cassete circular. Os três pequenos furos mostrados na Figura 2.8-b ajustavam-se a três parafusos contidos no disco de aço mostrado na Figura 2.6.

Completando a bancada para transferência de massa, a Figura 2.9 mostra o cassete circular de alumínio que era preenchido com naftaleno, formando a placa plana necessária para o estudo.

Os quatro furos maiores que são vistos serviam para o acoplamento de funis que auxiliavam no vazamento do naftaleno, enquanto que o furo menor servia para a fixação da junção do termopar utilizado. Os outros três pequenos furos situados na parte externa inferior do cassete possibilitavam a sua fixação na mesa de coordenadas de uma forma única. A mesa de coordenadas dispunha de três agulhas de fixação que se encaixavam nos furos guia do cassete. O local onde o naftaleno fica em contato com o alumínio é totalmente ranhurado para se conseguir uma perfeita aderência do naftaleno.

Na Figura 2.9-a, pode-se constatar a existência de um pequeno furo, situado na borda do cassete, que servia como ponto de referência para o sistema de aquisição de dados. A utilização deste ponto de referência será detalhada mais adiante.

2.3.2 - Medida do Número de Swirl

Visando poder caracterizar o escoamento na saída do jato, foi construída uma seção de testes para se medir o Número de Swirl. Este número relaciona a quantidade de movimento angular do escoamento com sua quantidade de movimento linear, e é usado por vários autores que estudam escoamentos espiralados semelhantes ao deste trabalho.

Previamente à esta construção, foi feita uma estimativa da ordem de grandeza do Número de Swirl, e constatou-se que o seu valor estava relacionado com um torque muito pequeno no sistema, o que impossibilitava a sua medição através de métodos convencionais como strain-gauges, molas, dinamômetros, etc. Para se ter uma idéia do quão pequeno era este torque, em testes preliminares o atrito existente em rolamentos era um impecilho para as nossas medidas.

Então teve-se que optar por um sistema que fosse isento de atritos ou qualquer força adicional que afetasse significativamente o torque já existente. Este sistema baseava-se num cilindro de nylon vazado, solidário a um fio de aço passando pelo seu centro, que por sua vez era fixado em uma das suas extremidades no interior da seção de testes e na outra era tracionado por um peso conhecido. Isto pode ser visto na Figura 2.10.

O cilindro de nylon mostrado na Figura 2.11, foi usinado com furos longitudinais dispostos de forma a ocupar o maior espaço possível na sua seção transversal, diminuindo desta forma ao máximo o seu peso. Os furos de 6.0 mm de diâmetro foram usinados em uma fresadora com a ajuda de um divisor universal, visando com isto obter uma total simetria da configuração vista na Figura 2.11-a.

O objetivo era fazer com que o jato espiralado passasse através deste cilindro de nylon, de modo que a quantidade de movimento angular existente no escoamento fosse totalmente transferida ao cilindro. Este então deveria girar de um determinado ângulo a depender da intensidade do escoamento espiralado, que era então medido.

Para se evitar que parte do escoamento escapasse dos furos contidos no cilindro, um tubo de papel foi fixado externamente ao cilindro de nylon como pode ser verificado na Figura 2.11-b. Este tubo de papel era propositadamente feito com papel milimetrado para servir como escala na observação do ângulo de giro do cilindro de nylon. Para se aproveitar o máximo do escoamento espiralado, foi adaptado a este tubo de papel um sistema de palhetas feito de isopor que é visto na Figura 2.11-b. Assim podia-se garantir uma maior confiabilidade nos ângulos observados.

Quando se estava fazendo as medidas do Número de Swirl, os parafusos de nivelamento do disco de aço mostrado na Figura 2.6, eram substituídos por outros, vistos agora na Figura 2.12. Eles fixavam uma outra placa de alumínio com um furo central de 0.5mm, com a ajuda de espaçadores, que nada mais eram do que tubos de alumínio com 45mm de comprimento.

Figura 2.12 - Sistema de fixação do Fio de Aço

O fio de aço passava através deste furo central, e devido a sua rigidez que impossibilitava o seu dobramento de forma eficiente, foi criado segundo a Figura 2.13 um dispositivo de alumínio para se fazer a fixação eficiente desta extremidade do fio. Note que este dispositivo ficava encostado na parte inferior da placa de alumínio, e as suas extremidades quadradas impossibilitavam o giro em torno do seu eixo.

Para se fixar o cilindro de nylon no fio de aço, duas buchas mostradas na Figura 2.14 foram idealizadas. A primeira, Figura 2.14-a, servia apenas como guia para que o eixo central do cilindro fosse alinhado com o eixo do fio, enquanto a segunda bucha, Figura 2.14-b, que era um pouco maior, possibilitava por meio de um pequeno parafuso transversal, a fixação do cilindro no fio de aço. O aperto deste parafuso era bastante pequeno para se evitar deformações no fio de aço, mesmo porque não era necessário uma maior força visto que o peso do cilindro era bastante reduzido.

Como pode ser visto na Figura 2.10, após passar por dentro do cilindro de nylon, o fio passava pelo centro do tubo entrando na câmara reguladora de escoamento espiralado e depois na câmara geradora de escoamento espiralado. Nesta última foi feito um pequeno furo de 2mm de diâmetro no disco de alumínio, mostrado na Figura 2.2, para possibilitar a passagem do fio de aço. Este pequeno furo ao término das medidas do Número de Swirl foi fechado com massa de calafetar.

Conforme a Figura 2.10, um esquema de contrapeso e roldanas foi criado para se garantir que o fio de aço ficasse esticado e com uma tensão desejada e conhecida.

Duas roldanas presas ao teto do laboratório por meio de parafusos chumbadores, tinham por função transmitir a tração conseguida com um peso pendurado na extremidade do fio de aço. Além disto a roldana que situava-se acima do tambor possuía uma liberdade de movimento que permitia uma perfeita centragem do fio dentro da câmara reguladora, bem como o seu alinhamento com o resto do sistema. Da mesma maneira que o disco de aço mostrado na Figura 2.6 permitia a centragem dos tubos com relação ao cassete circular, aqui este permite uma centragem do fio com os tubos utilizados.

Era necessário fazer-se uma prévia calibração do fio de aço, e como os efeitos do atrito impossibilitavam que isto fosse realizado no interior da seção de testes, o mesmo esquema utilizado na determinação do Número de Swirl foi reproduzido agora na horizontal, o que pode ser visto na Figura 2.15. O comprimento de fio de aço visto nesta figura era o mesmo que ia desde o ponto de fixação do fio de aço no interior do tambor até o seu primeiro ponto de contato com a primeira roldana do sistema.

Uma cantoneira com um furo de 0.5mm de diâmetro fixava uma das extremidades do fio com o mesmo dispositivo mostrado na Figura 2.13. A distância deste ponto de fixação até o cilindro de nylon era mantida idêntica ao caso em que o fio encontrava-se na vertical. Uma das roldanas era fixada de forma inversa permitindo que o arranjo se completasse. O mesmo peso utilizado na vertical era preso ao fio por meio do dispositivo já citado.

Figura 2.15 - Dispositivo de Calibração do Fio de Aço

Para o processo de calibração, um fio de nylon de 0.2mm de diâmetro era preso ao cilindro de nylon e nas suas extremidades dois recipientes plásticos serviam para armazenar pequenos pesinhos de chumbo, como é mostrado na Figura 2.15. Variando-se o peso em cada recipiente plástico era possível montar uma curva de calibração Torque x ângulo para o fio de aço. Tanto na montagem dentro da câmara de testes quanto na montagem para calibração, os ângulos de rotação do cilindro de nylon eram avaliados com uma luneta conforme será descrito no próximo capítulo.

2.4 - Outros Componentes

2.4.1 - Base Para Fundição do Cassete Circular

A técnica de sublimação de naftaleno exige que não haja interferência da geometria da superfície estudada no escoamento, então a fundição do naftaleno foi feita de forma a evitar este efeito indesejável.

Para evitar que uma não uniformidade da superfície de naftaleno influenciasse no nosso escoamento, alguns cuidados foram tomados como a utilização de uma base de inox,

Figura 2.16, para se fazer o vazamento do naftaleno líquido no cassete circular que acondicionava este naftaleno, esperando com isto obter-se uma superfície bastante uniforme, isenta de bolhas ou depressões.

Sabe-se que se esta superfície não fosse de uma planicidade razoável, o escoamento poderia sofrer alguma interferência destes acidentes, o que descaracterizaria os nossos resultados.

Esta base de inox apresentava uma planicidade excelente, e antes de se começar a operação de vazamento do naftaleno, devia-se garantir que ela estivesse com um aspecto de superfície espelhada. Podia-se conseguir este espelhamento através de um cuidadoso polimento no inox. A planicidade foi garantida no processo de fabricação quando um perfil foi preso à base, evitando com isto o seu empenamento enquanto era feita uma retífica. Vale ressaltar que a qualidade desta superfície de inox influenciava diretamente na superfície obtida de naftaleno.

2.4.2 - Funil de Enchimento e Respiros

Como ajuda à operação de fundição foi criado um funil especial, visto na Figura 2.17-a que ajustava-se a um dos furos do cassete circular mostrado na Figura 2.9. Por este funil era vazado o naftaleno líquido que ia moldar-se ao cassete circular.

Nos outros três furos, também mostrados na Figura 2.9, acoplavam-se três respiros idênticos, um deles visto na Figura 2.17-b, que serviam para que as bolhas existentes no interior do cassete fossem melhor expelidas, e para possibilitar uma maior facilidade quanto ao momento mais indicado para se parar o vazamento, visto que a medida que eles iam ficando cheios do líquido, não mais era necessário adicionar naftaleno.

Figura 2.17 - Funil de Enchimento e respiros

2.4.3 - Tubos

Foram utilizados no presente trabalho três tubos para se efetuar as corridas experimentais. Visava-se com esta diversificação poder cobrir um campo bem maior dos parâmetros envolvidos. O Número de Swirl, por exemplo, só poderia apresentar uma razoável faixa de variação se os tubos de diversos diâmetros fossem utilizados, pois não se conseguia pelas características do projeto, uma variação muito grande do Número de Swirl para um mesmo tubo.

Os tubos empregados eram trefilados e possuíam um bom acabamento interno, com 9, 13.2 e 22 mm de diâmetro interno. O comprimento de cada tubo variava, pois se queria manter uma adimensionalidade nos parâmetros estudados, e desta forma os tubos foram cortados de maneira a ter um comprimento de 18Dt (dezoito vezes o diâmetro interno de cada tubo).

O tubo de 22 mm de diâmetro interno era de bronze, o de 13.2 mm de latão e o de 9mm de aço.

2.4.4 - Luneta

Para se fazer a observação do ângulo de giro do cilindro de nylon, enquanto se estava determinando o Número de Swirl, foi utilizada uma Luneta da marca Hendsoldt Wetzlar. Esta luneta ficava presa a uma haste com base firme, de maneira que se podia variar a altura em que a mesma se encontrava a depender do caso que se estivesse estudando.

Quando estava-se observando o cilindro dentro da seção de testes, a luneta era posicionada bem próxima à janela de acrílico citada no item 2.3.1, enquanto que no caso da calibração do fio de aço esta distância tinha uma maior liberdade e não necessitava estar tão próxima ao experimento.

2.4.5 - Válvulas

Para o controle do fluxo de ar no circuito de aspiração foram instaladas duas válvulas na bancada experimental. A primeira, no sentido do fluxo de ar, era uma válvula de esfera, com diâmetro nominal de 50 mm, construída em bronze e aço inoxidável com conexões roscadas. Esta válvula permitia que um fluxo uniforme de ar fosse rapidamente estabelecido ou interrompido, evitando assim que a inércia do exaustor influenciasse significativamente a transferência de massa no início e no final de cada corrida. A segunda era uma válvula de gaveta, com diâmetro nominal de 50 mm, construída em bronze com conexões roscadas. Tinha por finalidade permitir o controle da vazão de ar, através do desvio do fluxo de ar que adentrava a seção geradora do escoamento espiralado, estabelecendo desta forma o Número de Reynolds desejado em cada corrida experimental.

2.4.6 - Exaustor

O fluxo de ar era promovido por um aspirador centrífugo, marca ASPÓ, modelo CR-4 acionado por um motor trifásico de 3 HP, ligado em Δ à uma rede de 220 V, consumindo uma corrente de 9 A. A vazão máxima succionada pelo exaustor fornecida pelo fabricante era de 3 m³/min para um diferencial de pressão máximo de 2500 mmH₂O.

Este exaustor foi instalado na parte de fora do laboratório, onde ocorria a descarga de ar. Esta localização garantia que o ar aspirado do ambiente estava isento de naftaleno. Isto foi necessário porque no tratamento dos dados considerava-se que o ar na entrada da seção de testes possuía concentração nula de naftaleno. Outra razão para a instalação do ventilador fora do laboratório foi a de se eliminar a contribuição da dissipação de calor do motor na elevação da temperatura do ar do laboratório. Esta preocupação de manter a temperatura constante se devia ao fato da pressão de vapor do naftaleno ser fortemente dependente da temperatura, e ser um parâmetro muito importante no tratamento dos dados.

2.5 - Instrumentação

2.5.1 - Medida de Tempo

Para se medir o tempo durante os ensaios experimentais de transferência de massa, foi utilizado um cronômetro digital marca Citizen, modelo Promaster, com incerteza de ± 0.01 segundo.

2.5.2 - Medida de Pressão

O diferencial de pressão na placa de orifício, bem como a pressão na entrada desta, foram medidos com dois manômetros de tubo em U com capacidade para 1 m de coluna de água. O que media o diferencial de pressão tinha a menor divisão da escala igual a 2mm, enquanto o outro tinha a menor divisão igual a 1 mm.

Um outro manômetro de tubo em U com a menor divisão da escala igual a 0.5mm foi utilizado para medir a pressão no interior da seção de testes, já que nos interessava saber a pressão na saída do jato, e esperava-se que ela diferisse significativamente da pressão obtida logo após a placa de orifício. Esta pressão foi utilizada no cálculo do Número de Swirl.

Para se obter a pressão atmosférica no exato instante em que estavam acontecendo os ensaios experimentais, dispusemos de um barômetro de coluna de mercúrio, marca FISHER, com resolução de 0.1 mmHg.

2.5.3 - Medida de Massa

Um dos pontos de crucial importância no experimento era a medida de massa, visto que um erro mais acentuado poderia gerar graves distorções nos resultados, tanto na medida de massa sublimada durante a exposição ao jato, quanto na medida da massa que sublimava enquanto eram feitas as operações de pesagem, mapeamento topográfico e ajuste do cassete circular dentro da seção de testes. Por isto, foi utilizada uma balança analítica digital, marca Sartorius, modelo 2402, com capacidade de até 200 g e resolução de 0.1 mg.

Esta balança encontrava-se sobre uma mesa especial que visava eliminar os efeitos decorrentes de vibrações, bem como possuía o seu prato de pesagem isolado do meio para evitar a influência indesejável de correntes de ar.

2.5.4 - Medida de Temperatura

A exigência de uniformidade da temperatura no interior do laboratório, obrigou a adoção de cuidados para que não nos afastássemos muito desta condição, já que foi verificado que uma variação de $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura do naftaleno usado para o ensaio, implicaria numa incerteza de aproximadamente 10% nos resultados dos coeficientes de troca de massa.

Desta maneira a temperatura do naftaleno e a temperatura do ar do laboratório que incidia sobre o cassete circular durante o ensaio, eram monitoradas no transcorrer de todo o ensaio, sendo verificado que em nenhuma das corridas, a variação da temperatura entre o início e o fim de uma corrida experimental ultrapassou o valor de $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para se monitorar a temperatura do laboratório foi utilizado um termômetro de mercúrio em vidro, ASTM 63C, com divisões da escala de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Já a temperatura do naftaleno era monitorada utilizando-se um termopar do tipo E, (Chromel-Constantan). Este termopar estava ligado a um conector que facilitava a retirada do cassete sem danificar a fundição do naftaleno, como pode ser visto pelo esquema mostrado na Figura 2.18. Isto era necessário para otimizar as operações de montagem e desmontagem, e conseqüentemente diminuir o tempo em que o naftaleno sublimava sem estar exposto ao jato de ar.

Pela Figura 2.18 vê-se que uma das junções do termopar estava inserida no naftaleno o que era feito na operação de fundição, enquanto a outra junção encontrava-se imersa em um banho de gelo. Com o intuito de melhorar a homogeneidade do banho e garantir a temperatura desejada na última junção citada, esta foi colocada no interior de um tubo de ensaio que continha óleo nujol, e este tubo por sua vez era imerso no banho de gelo.

Para se medir a força eletromotriz gerada pelo termopar, foi utilizado um multímetro digital, marca Hewlett Packard, modelo 3478A, com resolução de $1\mu\text{V}$.

Figura 2.18 - Ligação do Termopar

2.5.5 - Sistema Automático de aquisição de Dados

Para se determinar os coeficientes locais de troca de massa era necessário ter-se conhecimento da variação na profundidade da superfície do cassete circular em vários pontos. Isto era conseguido fazendo-se um mapeamento topográfico desta superfície por meio de uma mesa de coordenadas, que possuía um apalpador digital que registrava esta variação.

A mesa de coordenadas, que era constituída por duas mesas axiais unidirecionais montadas perpendicularmente, tinha também um local para fixação do cassete circular. A mesa movia-se controlada por um micro-computador de acordo com os pontos desejados, enquanto o apalpador que era fixo ia fazendo o levantamento topográfico do cassete.

Um posicionamento preciso foi conseguido pela utilização de fuso com folga axial nula e mancais lineares de folga radial nula, fabricadas pela EGROJ Industrial e RPL Rolamentos Paulistas, respectivamente. A mesa de coordenadas era movimentada por dois

motores de passo e interface controladora fabricadas pela SYNCRO Industrial, os quais propiciavam uma capacidade de 500 ou 1000 passos/revolução, com um erro não acumulativo inferior a 3% por incremento de passo. O curso máximo da mesa em cada direção ortogonal foi projetado para 200 mm, com uma incerteza no posicionamento de cerca de 0.05 mm.

O medidor de profundidade e o condicionador de sinal utilizado para fazer o levantamento topográfico da superfície de naftaleno foram fabricados pela DIADUR, apresentando uma resolução da ordem de 0.5 μm . A mesa de coordenadas era comandada por meio de um computador PC-XT compatível com o padrão IBM via uma porta paralela especialmente projetada. As leituras do medidor de profundidade eram passadas para o micro-computador via uma porta serial padrão RS232, sendo armazenados em disquetes para posterior redução dos dados.

A Figura 2.19 mostra uma fotografia do sistema automático de aquisição de dados. Nela pode-se ver a mesa de coordenadas, a interface controladora dos motores de passo, o processador do sinal do medidor de profundidade e o micro-computador PC-XT. A Figura 2.20 apresenta uma vista com detalhes da mesa de coordenadas, onde podem ser observados os motores de passo, o medidor de profundidade, a fixação do cassete circular, etc.

O algoritmo numérico de controle da mesa de coordenadas foi desenvolvido na linguagem TURBO BASIC, a partir de um outro já existente criado para uma outra tese [08].

Figura 2.19 - Sistema Automático de Aquisição de Dados

Figura 2.20 - Mesa de Coordenadas

CAPÍTULO 03

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com este capítulo objetiva-se mostrar todo o procedimento que foi utilizado na realização das corridas experimentais, bem como todos os preparativos que estivessem envolvidos com elas. Também são descritos os procedimentos relacionados com a determinação da intensidade do escoamento espiralado.

3.1 - Determinação do Número de Swirl

O escoamento espiralado é caracterizado pelo número de Reynolds e pela intensidade do componente circunferencial da velocidade dada pelo Número de Swirl.

O Número de Swirl relaciona a quantidade de movimento angular do escoamento com a sua quantidade de movimento linear. No nosso caso de escoamento turbulento, a quantidade de movimento linear do escoamento pode ser bem estimada utilizando-se a velocidade média do escoamento, obtida a partir da medida da vazão.

A quantidade de movimento angular do escoamento foi estimada utilizando-se o princípio de conservação da quantidade de movimento angular que diz que o somatório dos torques das forças externas agindo sobre um volume de controle é igual a variação da quantidade de movimento angular. Baseado neste princípio, foi construído o instrumento descrito na seção 2.3.2 e mostrado na Figura 2.11, utilizando o procedimento experimental que será apresentado a seguir.

1- Selecionava-se o tubo a ser utilizado, bem como o Número de Reynolds e a posição da câmara geradora de escoamento espiralado dentro da câmara reguladora. Os números de Reynolds usados nesta caracterização foram 9000, 18000, 27000, 36000 e 45000, enquanto que a posição adimensionalizada da câmara geradora variou segundo a relação $L/Dt = 0, 2, 5, 8$ e 11 .

2- Após serem ajustados estes parâmetros procedia-se a fixação do fio de aço segundo mostrado na Figura 2.10. Foi utilizado fio de aço com dois diâmetros diferentes, 0.2

e 0.3 mm, pois dependendo do tubo utilizado conseguia-se um ângulo de giro bem maior do cilindro de nylon, o que facilitava a sua leitura e diminuía a incerteza experimental.

O peso utilizado em uma das extremidades também variava em função dos parâmetros utilizados, pois em alguns casos ocorria vibração do fio induzida pelo escoamento, o que impossibilitava a leitura. Quando estava-se usando o fio de diâmetro 0.2mm, usou-se um peso de 4.085 Kg, enquanto que para o outro fio o peso usado foi de 6.091 Kg. O fio de maior diâmetro só foi utilizado para os ensaios com o tubo de 22 mm de diâmetro e para um caso ($Re_{Dt}=45000$) do tubo de 13.2 mm.

3- Fechava-se a seção de testes, posicionava-se a luneta de modo que um risco vertical, que servia como referência, coincidissem com uma marcação exata do papel milimetrado preso ao cilindro de nylon.

4- Ligava-se o exaustor e esperava-se que o cilindro estabilizasse em um determinado ponto para que se fizesse a leitura. Devido à inércia, e à grande aceleração imposta ao cilindro, este ficava durante um certo tempo oscilando em torno de um determinado ponto, que quase sempre coincidia com o ponto final de estabilização. Após a estabilização do cilindro, anotava-se então o valor do arco medido pelo papel milimetrado sendo este valor posteriormente transformado em ângulo de giro e em seguida em torque.

Na concepção deste experimento foi considerado que quando ocorresse o giro do cilindro de nylon, o fio de aço só estaria sujeito à torção no trecho que ia do ponto de fixação no interior do tambor até o ponto de contato com a primeira roldana presa ao teto. Foi verificado que isto era verdade através da fixação de uma fita adesiva no fio de aço num trecho que ficava imediatamente após esta roldana. Em todos os experimentos observou-se que durante o giro do cilindro de nylon esta fita adesiva permanecia parada, o que significava que o fio de aço não torcia neste ponto.

A distância adimensional da saída do jato até o cilindro de nylon foi sempre $H/Dt = 1.0$. Isto porque observou-se que esta distância era a que fornecia uma absorção máxima da quantidade de movimento contida no escoamento pelo cilindro de nylon.

Os procedimentos citados foram repetidos para todas as variações desejáveis dos parâmetros, para cada um dos tubos existentes.

3.2 - Calibração do Fio de Aço

Após terem sido determinados os ângulos de torção do cilindro de nylon, era necessário se fazer uma calibração do fio de aço, para transformar este resultado em medidas de torque.

Para este fim o esquema mostrado na Figura 2.15 era montado, enfatizando-se que todas as condições usadas no item anterior eram rigorosamente repetidas no procedimento de calibração.

As etapas envolvidas neste processo são descritas a seguir:

1- Fixava-se o fio de aço, o cilindro de nylon, o peso responsável pela tração do fio, e posicionava-se a luneta de modo que uma linha horizontal da mesma servisse como referência.

2- Observava-se o posicionamento do cilindro de nylon sem o carregamento dos pesos de chumbo. Esta posição era tomada como referência pois representava a posição de equilíbrio do fio sem a aplicação de qualquer torque externo.

3- Fixava-se um fio de nylon em torno do cilindro, fixando em suas extremidades dois recipientes plásticos, onde seriam posteriormente colocados os pesos de chumbo. A seguir observava-se através da luneta a posição angular do cilindro com o objetivo de verificar se a posição de equilíbrio observada no item anterior havia sido mantida. Caso houvesse alguma alteração nesta posição, pesos de chumbo eram colocados nos recipientes até o restabelecimento da posição de equilíbrio, que indicava ausência de torques externos.

4- A partir daí, pequenos pesos de chumbo previamente pesados em uma balança de precisão, eram colocados um a um, e a cada peso adicionado a um dos recipientes acontecia um giro no cilindro de nylon. Como os pesinhos eram conhecidos, assim como o raio do cilindro de nylon, era possível determinar o torque produzido para cada soma de pesos que estivesse no recipiente. Por consequência, pode-se traçar uma curva do torque em função do ângulo de giro para cada um dos fios utilizados. Esta curva foi obtida também para diferentes estados de tração do fio de aço.

De posse destas curvas e dos respectivos ângulos de giro para cada situação de

escoamento, pode-se finalmente obter uma relação entre os parâmetros Número de Reynolds, L/Dt e o Número de Swirl.

Uma observação deve ser feita com relação à flexão que ocorria com o fio de aço, devido ao peso do cilindro de nylon, já que este encontrava-se agora na horizontal. Isto já estava previsto, e os pesos utilizados no ítem anterior foram dimensionados com o objetivo de diminuir este inconveniente. Para avaliar a influência da flexão do fio, foram realizados testes comparativos onde 2 conjuntos de pesinhos foram adicionados aos recipientes. Ambos os conjuntos apresentavam a mesma diferença de pesos em cada recipiente, portanto produziam o mesmo torque. O segundo conjunto no entanto possuía maior peso, produzindo maior flexão do fio de aço. Os testes revelaram os mesmos resultados para ambos os casos.

3.3 - Preparação Para as Medidas de Transferência de Massa

3.3.1 - Destilação do Naftaleno

Como o naftaleno utilizado para os nossos ensaios era em parte um naftaleno comercial e em outra, restos de naftaleno utilizados em tese anterior a esta, foi imprescindível a destilação do naftaleno para que as propriedades do mesmo estivessem bem definidas.

Esta etapa do experimento foi feita com a utilização dos vários equipamentos descritos a seguir e mostrados esquematicamente na Figura 3.1.

Um balão de vidro, marca Pyrobras, com capacidade de 1.0 l, um aquecedor elétrico marca FisAtom, modelo 102, 115 volts, 300 watts, utilizado para aquecer o balão de vidro, um recipiente retangular de alumínio, com capacidade de 1.0 l, para se fazer a desmoldagem dos cassetes, do funil e dos respiros, um bico de bunsen, um recipiente cilíndrico de alumínio, com capacidade de 1.0 l, para armazenar o naftaleno destilado e um termômetro de mercúrio em vidro, marca Arba, graduado de 0 a 400 °C, com uma resolução de 1 °C, para medir a temperatura do naftaleno.

Todo o naftaleno disponível era colocado no interior do balão de vidro. Se os pedaços de naftaleno fossem de um tamanho maior que a boca do balão, estes eram previamente derretidos em um dos recipientes e derramados no interior do balão. Isto era feito com aquecimento pelo bico de bunsen.

O aquecedor elétrico era utilizado para aquecer o balão, enquanto o termômetro monitorava a temperatura do naftaleno. A temperatura no naftaleno ia aumentando, até que ao atingir um valor aproximado de 212°C começava a vaporizar, e um pequeno tubo preso à parte superior do balão, que funcionava como um condensador, fazia com que o naftaleno puro escorresse pelo mesmo até o recipiente cilíndrico de alumínio.

Após uma grande quantidade de naftaleno ser destilada para o recipiente, um pouco do mesmo ainda restava no fundo do balão, mas com grande quantidade de impurezas. Esta escória era despejada em moldes de forma não definida, e não mais era utilizada nos nossos experimentos.

3.3.2 - Fundição do Naftaleno no Cassete Circular

Este é um dos pontos de maior atenção durante o experimento, já que estávamos trabalhando com material inflamável, e a qualidade da superfície obtida era um item de muita importância. Esta fundição obedecia o seguinte roteiro:

1- Os cassetes circulares utilizados em um ensaio anterior, o funil de enchimento e os respiros eram desmoldados a quente. Esta operação consistia em colocar os objetos citados dentro de um recipiente retangular de alumínio, um de cada vez, e este recipiente por sua vez era aquecido por um bico de bunsen. O recipiente encontrava-se sobre um tripé para que o bico de bunsen pudesse ficar embaixo do mesmo.

O naftaleno que era obtido nesta desmoldagem, era colocado em um recipiente de espera, para que este naftaleno fosse posteriormente destilado para ser novamente utilizado no experimento, diminuindo assim a necessidade de se comprar mais naftaleno.

2- Com o uso de redutor, a base para fundição era limpa, retirando desta maneira restos de naftaleno de uma fundição anterior. Em seguida esta base era polida com a

utilização de uma massa para polir de nome Kolimar, enquanto estopas e flanelas davam o acabamento final desejado. Redutor era novamente utilizado para fazer uma limpeza final da base de fundição e posteriormente novo polimento era obtido com a utilização de flanelas.

3- Após este polimento o cassete circular era posicionado sobre a base para fundição, segundo Figura 3.2, e sobre ele eram colocados o funil de enchimento, os respiros e um pedaço de tubo de aço de diâmetro externo aproximadamente igual ao diâmetro externo do cassete circular e de parede fina. Este pedaço de tubo era aí posicionado com a intenção de pressionar o cassete sobre a base evitando o escoamento do naftaleno, e também com isto fazendo com que toda a borda do cassete ficasse em contato com a base, possibilitando uma perfeita superfície do naftaleno fundido. O termopar era previamente introduzido em um dos furos do cassete, e preso com fita adesiva em uma tal posição que garantisse que a junção do termopar estivesse próxima à superfície da base de fundição.

4- O naftaleno sólido que encontrava-se no recipiente cilíndrico já citado era então aquecido da mesma maneira descrita no item 1, até que uma temperatura de 140 °C fosse obtida. Esta temperatura foi considerada satisfatória para o bom acabamento da superfície de naftaleno. Um registro existente neste recipiente era então aberto permitindo que o naftaleno escoasse pelo funil de enchimento preenchendo todo o interior do cassete circular, até que o naftaleno líquido começasse a encher os respiros. Com o funil e os respiros cheios, acabava-se a necessidade de se adicionar mais naftaleno líquido aos mesmos devido a contração no volume que ocorria durante a solidificação, visto que a quantidade restante nos mesmos compensava esta necessidade.

Após um período de resfriamento de aproximadamente 15 minutos, tempo suficiente para a solidificação do naftaleno, o cassete era descolado da base para fundição. Imediatamente após este descolamento, uma minuciosa inspeção da superfície obtida era feita, já que nem sempre o processo de fundição se mostrava satisfatório, além do que, no ato do descolamento do cassete uma possível danificação da superfície poderia ocorrer. Este descolamento era efetuado com pequenos golpes dados com um martelo sobre um pedaço de madeira que encostava-se na borda do cassete circular. Se fosse verificado que a superfície não atendia as nossas expectativas, voltava-se ao item 1.

Figura 3.2 - Esquema Para Fundição

Caso o contrário ocorresse, os furos do cassete circular eram tampados com fita adesiva e o cassete era envolvido com papel alumínio e colocado no interior do laboratório para entrar em equilíbrio térmico.

5- O ar condicionado do laboratório que em momento algum desligava-se, fazia com que a temperatura no interior do laboratório estivesse sempre estável, em torno de 20°C. Assim, quando os cassetes chegavam ao laboratório, já encontravam uma temperatura propícia à experiência, e então os mesmos ficavam ali por um tempo nunca inferior à 8 horas, para que entrassem em equilíbrio térmico com o meio. Foram feitos testes preliminares para garantir que após decorridas estas 8 horas, o cassete estivesse em equilíbrio com a temperatura do laboratório. Na verdade o equilíbrio era conseguido em um tempo inferior, $\pm$ 5.5 horas, mas para se ter uma maior confiabilidade no que diz respeito ao equilíbrio, optou-se por permitir que o tempo de permanência do cassete no interior do laboratório para se conseguir o equilíbrio fosse de 8 horas.

Quando se estava fazendo medidas de transferência de massa o esquema experimental utilizado é aquele já mostrado na Figura 2.1. A seguir descreveremos em seqüência todas as etapas deste tipo de corrida experimental.

3.4 - Ajuste dos Parâmetros do Experimento

Cada experimento a ser realizado era caracterizado por três parâmetros adimensionais: Número de Reynolds, Número de Swirl e distância jato/placa. O ajuste destes parâmetros era realizado enquanto aguardava-se que os cassetes contendo naftaleno entrassem em equilíbrio térmico com o ambiente do laboratório.

O tubo escolhido para um determinado experimento era instalado na seção de testes. Em seguida a distância jato/placa era ajustada utilizando-se espaçadores previamente usinados com dimensões tais que fornecessem as distâncias adimensionais pré-determinadas.

A intensidade do escoamento espiralado, dada pelo Número de Swirl, desejada para um determinado experimento, era conseguida ajustando-se a posição da câmara geradora de Swirl dentro da Câmara reguladora de acordo com os dados obtidos durante a calibração do fio de aço descrita na seção 3.2.

Finalmente o número de Reynolds desejado era ajustado através da atuação na válvula reguladora e leitura do diferencial de pressão da placa de orifício.

3.5 - Medidas de Transferência de Massa

Uma vez que os parâmetros do experimento estavam ajustados e assim que se chegasse ao tempo necessário para se conseguir o equilíbrio térmico do cassete com naftaleno, iniciava-se a corrida experimental propriamente dita, obedecendo aos seguintes itens:

- 1- O cassete circular era desembalado do papel de alumínio e fixado à mesa de coordenadas.

- 2- Por intermédio do micro-computador efetuava-se os comandos necessários para se iniciar o mapeamento do cassete. Isto era feito após ligar-se a interface controladora dos motores de passo e o conversor analógico-digital. O apalpador era então posicionado em um pequeno furo situado na borda do cassete que servia como ponto de referência para a mesa de coordenadas, conforme citado anteriormente. Em seguida eram realizadas

automaticamente as medidas sobre pontos na superfície previamente estabelecidos.

3- Uma vez terminado este levantamento topográfico, o cassete circular era solto da mesa de coordenadas e levado para a balança de precisão para se fazer a sua pesagem. Ao mesmo tempo o micro-computador estava armazenando em arquivos, todas as informações conseguidas com o mapeamento como por exemplo, as coordenadas X, Y e Z de cada ponto examinado pelo apalpador.

4- O cassete era então fixado na placa de acrílico que por sua vez era devidamente colocada no interior da seção de testes. O conector do termopar era encaixado ao outro conector que ficava de espera dentro da seção de testes, e procedia-se o fechamento da seção.

5- O exaustor era então ligado para que se desse a exposição do naftaleno ao jato de ar. O tempo de exposição era conhecido a partir de testes preliminares, de maneira que a profundidade de naftaleno sublimada ficasse em torno de 70 μm para que a sublimação não provocasse distorção na superfície de naftaleno e que, por outro lado, obtivéssemos resultados com incertezas experimentais aceitáveis. O tempo de exposição variou de 40 a 80 minutos dependendo da configuração utilizada. A válvula de esfera era acionada para dar início ao escoamento dentro da seção de testes e simultaneamente era acionado o cronômetro responsável pelo registro do tempo do experimento.

6- Enquanto o exaustor encontrava-se ligado, periodicamente eram feitas leituras no multímetro, no termômetro de vidro, nos manômetros de tubo em U e no barômetro. Todos estes valores eram devidamente anotados em uma planilha de dados, bem como demais dados relativos aos ajustes já efetuados.

7- Ao término desta operação, a válvula de esfera era fechada, a duração da experiência registrada, o exaustor era desligado, a seção era aberta, o conector do termopar era desconectado e o cassete era novamente pesado.

8- Novamente procedia-se a operação de levantamento topográfico do cassete circular visitando-se os mesmos pontos da superfície medidos anteriormente.

9- Como todas as etapas descritas acima eram acompanhadas de rigoroso controle dos seus tempos de duração, era feito agora uma simulação das etapas de 3 a 7, somente com a exceção do acionamento do exaustor, para que se pudesse obter o valor

aproximado da massa indesejavelmente sublimada durante o manuseio do cassete sem que este estivesse exposto ao jato de ar. A massa sublimada devido unicamente ao jato de ar, pode ser conseguida subtraindo-se a massa sublimada na simulação, da massa total sublimada durante o ensaio.

10- De posse dos dados do experimento, podia-se fazer a redução de dados, que nos dava os valores dos coeficientes de troca desejados.

Durante todas as etapas do experimento tomou-se o cuidado de não manter muito contato da mão com o cassete, para que calor indesejável não fosse transferido para o mesmo.

No item 2.3.1 foi citado um furo de referência, que ficava na borda do cassete circular. Este furo tinha por função permitir que nos dois levantamentos topográficos feitos durante o ensaio, a mesa de coordenadas tivesse o mesmo ponto de referência para o seu sistema de coordenadas, e com isto o apalpador estaria medindo a profundidade de um mesmo ponto nos dois mapeamentos. O apalpador era posicionado neste furo por observação de um display do conversor analógico-digital, que mostrava a atual profundidade do ponto em que o apalpador se encontrava. Com um ajuste fino de movimento da mesa podia-se conseguir um ponto de máxima profundidade que era tomado como referência, e o display citado era então zerado. Este procedimento mostrou-se rápido, e teve uma excelente repetibilidade, sendo aceito como uma excelente maneira de obter um ponto de referência.

O número de pontos a serem medidos sobre a superfície do naftaleno foi determinado a partir de experiências preliminares. Nestas experiências foram tomadas medidas ao longo de quatro diâmetros defasados de 45° conforme mostra a Figura 3.3. Em cada diâmetro foram efetuadas 135 medidas, o que corresponde a um espaçamento de 1mm entre os pontos.

A Figura 3.4 apresenta um resultado típico destes testes preliminares. Nesta figura o coeficiente de troca de massa adimensional (Número de Sherwood) é apresentado em função da coordenada radial adimensional, r/Dt , para cada um dos oito raios medidos. Como pode ser observado na figura, existe uma excelente simetria circunferencial dos resultados obtidos.

Baseado nestes resultados optou-se por realizar medições ao longo de apenas dois

diâmetros ortogonais, como mostrado na Figura 3.5. Desta forma foi possível diminuir sensivelmente o tempo necessário para o levantamento topográfico em cada experimento. Tipicamente eram necessários 7 minutos para medir os cerca de 270 pontos que compunham os dois diâmetros ortogonais.

Figura 3.3 - Malha Com 4 Diâmetros

Figura 3.4 - Demonstração da Simetria no Cassete

Figura 3.5 - Malha Utilizada

CAPÍTULO 04

TRATAMENTO DOS DADOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos utilizados na redução dos dados experimentais. Estes procedimentos foram implementados em programas que tinham como entrada os dados automaticamente armazenados em arquivos pelo sistema de medição computadorizado utilizado.

A redução dos dados tinha como objetivo o cálculo do número de Reynolds do jato, número de Sherwood local e médio e do número de Swirl.

4.1 - Calibração do Fio de Aço do Medidor de Swirl

Utilizando-se o esquema mostrado na Figura 2.15 e o procedimento descrito na seção 3.2 foram obtidas duas curvas de calibração para os dois fios de aço utilizados neste experimento. Estas curvas relacionavam o torque produzido no cilindro de nylon pelos pesos de chumbo colocados em recipientes de plástico presos a este cilindro, com o ângulo de giro observado utilizando-se uma luneta.

Para o fio de diâmetro 0.3mm os pontos experimentais obtidos são mostrados na Figura 5.5, assim como uma curva ajustada pelo método dos mínimos quadrados. A expressão que representa esta curva e que foi utilizada nos cálculos deste trabalho é dada por:

$$\text{Torque} = (0.86 \theta + 0.59) \times 10^{-5} \text{N.m} \quad (4.1)$$

Já para o fio de 0.2mm de diâmetro, os pontos experimentais e a curva de ajuste são mostrados na Figura 5.4, sendo representada pela seguinte expressão:

$$\text{Torque} = (0.23 \theta - 2.26) \times 10^{-5} \text{N.m} \quad (4.2)$$

onde θ representa o ângulo de giro do cilindro de nylon, em graus.

4.2 - Determinação do Número de Swirl

O Número de Swirl é um parâmetro adimensional comumente utilizado para caracterizar escoamentos espiralados. Conforme citado anteriormente este número relaciona a quantidade de movimento angular do escoamento com a sua quantidade de movimento linear.

Este número é dado por:

$$S = \frac{G_{\phi}}{rG_x} \quad (4.3)$$

onde G_{ϕ} representa a quantidade de movimento angular e é expressa por:

$$G_{\phi} = 2\pi \int \rho u w r^2 dr \quad (4.4)$$

G_x é a quantidade de movimento linear do escoamento expressa por:

$$G_x = 2\pi \int \rho u^2 r dr + 2\pi \int p r dr \quad (4.5)$$

nestas expressões u é a velocidade axial do escoamento, w a sua velocidade circunferencial e r é a coordenada radial.

Button e Rhine [05] apresentam um Número de Swirl modificado, proposto por Kerr e Fraser, em que assume-se que a variação da densidade e que a contribuição do campo de pressões são desprezíveis. Este número também é definido pela expressão 4.3, mas as expressões para a obtenção das quantidades de movimento relacionadas ao escoamento são agora definidas por:

$$G_x = 2\pi \rho \int u^2 r dr \quad (4.6)$$

$$G_{\phi} = 2\pi \rho \int u w r^2 dr \quad (4.7)$$

No nosso caso G_x foi obtido considerando a velocidade do jato como sendo uniforme ao longo da sua seção transversal. Assim, a expressão 4.6 pode ser reescrita como:

$$G_x = \pi \rho \bar{V}^2 R^2 \quad (4.8)$$

A quantidade de movimento angular podia ser avaliada utilizando-se o princípio de conservação da quantidade de movimento, medindo-se o torque no cilindro de nylon. Rhine [05] utiliza uma avaliação semelhante a esta. Este torque era determinado pelas expressões 4.1 e 4.2 a partir de ângulos de giro já obtidos para as diversas configurações a serem estudadas.

A massa específica do ar utilizada no cálculo de G_x , era obtida através da equação dos gases perfeitos (A1.3) mostrada no Apêndice I, utilizando-se a pressão medida na saída do jato.

A velocidade média era obtida a partir da vazão mássica do jato de ar, que era determinada pelo programa que calculava o Número de Reynolds, e que é descrito no Apêndice I. Assim, após ter determinado o número de Reynolds a ser utilizado em cada experimento, a velocidade média do jato era obtida como:

$$\bar{V} = \frac{\dot{W}}{\rho_{ar} A_j} \quad (4.9)$$

onde A_j é a área do jato de cada tubo utilizado neste experimento e $\dot{W}$ é a vazão mássica obtida do medidor de vazão como indicado no Apêndice I.

4.3 - Equação do Plano de Referência

Já foi citado que o cassete circular fixava-se de forma única na mesa de coordenadas por três pontos de contato. Mesmo assim, quando o cassete circular era fixado para o segundo levantamento topográfico, ele poderia ficar um pouco inclinado com relação ao seu posicionamento anterior.

Na verdade, a observação que deve ser feita é a seguinte: Se o cassete ao ser fixado na mesa estivesse exatamente na horizontal, as leituras feitas pelo apalpador representariam as coordenadas em relação ao eixo Z sem qualquer erro. Porém, caso o cassete ficasse ligeiramente inclinado, o que era plenamente possível, as medidas efetuadas pelo apalpador estariam mascaradas, já que os pontos situados na parte mais baixa do cassete

estariam ganhando profundidade sublimada, enquanto os pontos mais altos estariam perdendo profundidade sublimada.

Para que este erro fosse eliminado das nossas observações foi feita uma correção nas medidas feitas pelo apalpador. Esta correção baseava-se em três pontos que estavam localizados na borda do cassete de alumínio. Quando o mapeamento estava sendo feito o apalpador ia até a borda do cassete por três vezes, e registrava as coordenadas destes pontos. De posse destas coordenadas podia-se determinar a equação de um plano que passava por estes três pontos, e com esta equação e as coordenadas dos pontos mapeados, determinava-se a distância entre estes pontos e o plano citado para cada um dos ensaios individualmente. Isto foi feito utilizando-se a teoria de vetores no espaço [18],[09]. O objetivo era que isto fosse feito nos dois mapeamentos, para que a profundidade final sublimada fosse a diferença entre duas distâncias com relação ao plano de referência.

O que pretende-se mostrar, é que se o cassete ao ser fixado, por algum motivo estivesse inclinado, as coordenadas Z lidas pelo apalpador poderiam mudar se logo em seguida o cassete fosse retirado, novamente fixado e posteriormente mapeado. No entanto ainda que esta diferença no posicionamento do cassete ocorresse, as distâncias com relação ao plano de referência permaneceriam constantes.

Aqui estava-se admitindo que uma vez que o ponto de referência tinha uma boa repetibilidade, e uma vez que a usinagem do cassete havia sido feita para que a superfície da borda do cassete tivesse um acabamento ideal, o plano encontrado nos dois mapeamentos era o mesmo. Assim, eram de grande confiança os resultados obtidos no levantamento topográfico do cassete.

4.4 - Coeficientes Médios de Troca de Massa

O coeficiente médio de transferência de massa para cada cassete circular era obtido a partir da pesagem e cronometragem do tempo de duração de cada ensaio. Este coeficiente é dado pela seguinte expressão:

$$k = \frac{\dot{M}}{A_c \Delta \rho_n} \quad (4.10)$$

onde $\dot{M}$ é a taxa de transferência de massa do cassete, A_c é a área da superfície de transferência de massa e $\Delta\rho_n$ é a diferença de concentração do vapor de naftaleno na superfície e no ar.

A taxa de transferência de massa, $\dot{M}$, que aparece na expressão (4.10) é dada por:

$$\dot{M} = \frac{\Delta M_n}{\tau} \quad (4.11)$$

onde nesta expressão, ΔM_n representa a massa sublimada de naftaleno já corrigida durante a corrida experimental e τ é o tempo de duração desta mesma corrida.

Foi dito anteriormente que a massa sublimada durante os ensaios era corrigida. Isto era feito devido à sublimação indesejável de naftaleno enquanto estava-se manuseando objetos pertencentes ao experimento sem que o exaustor estivesse ligado. Esta sublimação indesejável era denominada massa de simulação. A correção era feita da seguinte maneira:

$$\Delta M_n = (\text{Massa Inicial}) - (\text{Massa Final}) - (\text{Massa Simulação}) \quad (4.12)$$

Para determinar-se a diferença de concentração de naftaleno no cassete, foi considerado que a concentração de mistura do vapor de naftaleno no fluxo de ar era igual a zero no centro do cassete ($\rho_{n(i-1)} = 0$), já que admitiu-se também que o ar do laboratório não continha vapor de naftaleno. As posições mais afastadas na direção radial do cassete possuíam uma concentração diferente de zero devido a sublimação do naftaleno imposta pelo jato.

A concentração de mistura do vapor de naftaleno no ar na extremidade do cassete é dada por:

$$\rho_{n(i)} = \rho_{n(i-1)} + \frac{\rho_{ar} \dot{M}}{\dot{m}} \quad (4.13)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar e $\dot{m}$ é o fluxo total de massa, considerado igual ao fluxo de ar, já que a descarga de vapor de naftaleno era desprezível quando comparada com o fluxo de ar ($< 0.0016\%$). A massa específica do ar utilizada acima é obtida através da equação dos gases perfeitos (A1.3) mostrada no Apêndice I.

A diferença de concentração de naftaleno pode ser dada por uma diferença média logarítmica de concentração definida por:

$$\Delta p_n = \frac{(\rho_{np} - \rho_{n(i-1)}) - (\rho_{np} - \rho_{n(i)})}{\ln \frac{(\rho_{np} - \rho_{n(i-1)})}{(\rho_{np} - \rho_{n(i)})}} \quad (4.14)$$

Nesta expressão ρ_{np} representa a concentração de vapor de naftaleno na parede e pode ser obtida utilizando-se a equação dos gases perfeitos como sendo:

$$\rho_{np} = \frac{p_{np} M_n}{RT_p} \quad (4.15)$$

onde M_n é a massa molecular do naftaleno, R é a constante universal dos gases e T_p é a temperatura da parede de naftaleno em K. p_{np} é a pressão de vapor de naftaleno, dada em Pa, avaliada na temperatura da parede através da equação de Sogin [10]:

$$p_{np} = 47.87504 \times 10^{\left(\frac{3729.444}{T_p}\right)} \quad (4.16)$$

É comum tratar o coeficiente de transferência de massa na forma adimensional através do Número de Sherwood:

$$Sh_m = \frac{k\ell}{D_{n/ar}} \quad (4.17)$$

onde $D_{n/ar}$ é o coeficiente de difusão do naftaleno no ar e ℓ é uma dimensão característica, que neste trabalho corresponde ao diâmetro do jato.

O coeficiente de difusão que aparece na definição do número de Sherwood é calculado com a utilização do número de Schmidt:

$$Sc = \frac{\mu_{ar}}{\rho_{ar} D_{n/ar}} \quad (4.18)$$

Neste trabalho adotou-se o valor 2.5 para o número de Schmidt (Sc), de acordo com a prática utilizada em trabalhos que utilizam a técnica de sublimação de naftaleno.

Portanto, combinando as expressões 4.17 e 4.18, o número de Sherwood médio é determinado pela expressão:

$$Sh_m = \frac{\rho_{ar} k D t Sc}{\mu_{ar}} \quad (4.19)$$

4.5 - Coeficientes Locais de Troca de Massa

Na determinação destes coeficientes, utilizou-se o sistema automático de aquisição de dados, descrito na seção 2.5.5. Desta maneira não mais interessavam os valores obtidos nas operações de pesagem, mas as profundidades conseguidas com o mapeamento do cassete circular. Estas profundidades em conjunto com o tempo de duração de cada ensaio, possibilitavam a determinação da massa sublimada em cada ponto visitado. Estes pontos situavam-se no centro de uma célula imaginária, que possuía área de transferência de massa diferente para cada ponto considerado.

A taxa de transferência de massa local por unidade de área é dada por:

$$\dot{m}_{n(j)} = \frac{\rho_{ns} \Delta Y_{(j)}}{\tau} \quad (4.20)$$

onde ρ_{ns} é a massa específica do naftaleno sólido e $\Delta Y_{(j)}$ é a profundidade de naftaleno sublimada em cada ponto j .

A concentração de naftaleno no fluxo de ar era determinada em cada um dos pontos visitados através da seguinte expressão:

$$\rho_{n(j)} = \rho_{n(j-1)} + \frac{\rho_{ar} \sum_{j=1}^{nc} \dot{m}_{n(j)} A_{cl(j)}}{\dot{m}} \quad (4.21)$$

onde nc representa o número de células ao longo da direção radial do cassete, $A_{cl(j)}$ é a área de transferência de troca de cada uma das células consideradas e $\dot{m}$ é a vazão mássica de ar.

Com a mesma consideração já utilizada de que o laboratório era isento de naftaleno, para esta expressão considerou-se $p_{n(0)}$ igual a zero para a primeira célula considerada.

A diferença de concentração do vapor de naftaleno é dada pela diferença média logarítmica de concentrações (expressão 4.14), reescrita na forma:

$$\Delta p_{n(j)} = \frac{(p_{np} - p_{n(j-1)}) - (p_{np} - p_{n(j)})}{\ln \frac{(p_{np} - p_{n(j-1)})}{(p_{np} - p_{n(j)})}} \quad (4.22)$$

Os coeficientes locais de transferência de massa eram calculados utilizando-se a seguinte expressão:

$$k_{(j)} = \frac{\dot{m}_{n(j)}}{\Delta p_{n(j)}} \quad (4.23)$$

O coeficiente local de transferência de massa na forma adimensional, é obtido através da determinação do Número de Sherwood local dado por:

$$Shl_{(j)} = \frac{Dt \rho_{ar} k_{(j)} Sc}{\mu_{ar}} \quad (4.24)$$

Uma comparação entre os resultados obtidos através de pesagem (médios) e os resultados obtidos através do mapeamento (locais), era feita comparando-se o fluxo total de massa em ambos os casos. O fluxo total de massa de naftaleno pode ser expresso em função dos coeficientes locais via integração das densidades de fluxo ao longo de toda a superfície de naftaleno como sendo:

$$\dot{M}_n = \sum_{j=1}^{nc} k_{(j)} A_{cl(j)} \Delta p_{n(j)} \quad (4.25)$$

Substituindo-se o valor do fluxo total de massa obtido na expressão 4.25 na expressão 4.10, obtém-se o coeficiente médio de transferência de massa que deve ser igual ao obtido através da pesagem do cassete. A substituição deste coeficiente na expressão 4.19, possibilita a obtenção do valor médio do Número de Sherwood através do mapeamento do cassete circular.

CAPÍTULO 05

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos de troca de massa, assim como resultados utilizados na determinação do Número de Swirl que caracteriza o escoamento.

Estes resultados serão divididos em seções para facilitar o entendimento da influência do espiralamento do jato na troca de massa da superfície.

5.1 - Resultados do Número de Swirl

Os procedimentos de cálculo do Número de Swirl foram apresentados no capítulo anterior, de acordo com os procedimentos experimentais descritos no capítulo 3. A seguir são apresentados os resultados obtidos nas várias etapas que envolveram a determinação do Número de Swirl.

5.1.1 - Ângulo de Giro do Cilindro de Nylon (θ)

Nas figuras 5.1 a 5.3 são mostrados os resultados obtidos nos ensaios para a determinação do ângulo de giro do cilindro de nylon como descrito no item 3.1, para os três diâmetros dos tubos utilizados. Nestas figuras, o ângulo de giro, θ , do cilindro é apresentado em função do Número de Reynolds do jato, Re_{Dt} . São apresentadas curvas para diversas intensidades do escoamento espiralado representadas pela posição adimensional L/Dt da câmara geradora. Cabe lembrar que de acordo com a construção da câmara geradora de escoamento espiralado, a posição $L/Dt = 0$ corresponde à máxima intensidade do escoamento espiralado, enquanto que a posição $L/Dt = 11$ corresponde à intensidade mínima.

Os resultados apresentados nas figuras 5.1 a 5.3 mostram, como era esperado, que o ângulo de giro do cilindro de nylon aumenta com o aumento de Re_{Dt} , e com a diminuição de L/Dt . Pode ser observado também que as maiores variações de θ com L/Dt ocorrem para os maiores valores de Re_{Dt} .

Figura 5.1 - Ângulo de Giro - Tubo 9.0mm

Figura 5.2 - Ângulo de Giro - Tubo 13.2mm

Figura 5.3 - Ângulo de Giro - Tubo 22.0mm

Na Figura 5.2 aparecem pontos aparentemente destoantes no gráfico para $Re_{Dt}=45000$. Estes pontos aparecem destacados na figura, envolvidos por uma linha tracejada. Na verdade isto acontece devido ao fato que para o tubo de diâmetro igual a 13.2mm foram utilizados fios de aço com dois diâmetros diferentes nos experimentos.

Com excessão dos experimentos para $Re_{Dt} = 45000$, todos os outros experimentos foram realizados com o fio de diâmetro 0.2mm. No caso de $Re_{Dt} = 45000$ problemas de vibração do fio e instabilidade do cilindro de nylon obrigavam a utilização do fio com 0.3mm de diâmetro. Portanto, foram utilizadas curvas de calibração distintas para converter os resultados destes dois fios de aço para torque.

5.1.2 - Curvas de Calibração

Seguindo o procedimento descrito na seção 4.2 para a determinação do Número de Swirl, foram obtidas as curvas de calibração dos fios de aço, de onde foram extraídas as

Figura 5.4 - Curva de Calibração para o Fio de Aço de 0.2mm de Diâmetro

Figura 5.5 - Curva de Calibração para o Fio de Aço de 0.3mm de Diâmetro

expressões do torque desejado para o cálculo da quantidade de movimento angular. As curvas obtidas e os pontos experimentais são mostrados nas figuras 5.4 e 5.5, onde pode-se verificar um baixo desvio de linearidade em todas elas.

As curvas mostradas nas figuras 5.4 e 5.5 foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados fornecendo as expressões 4.15 e 4.16 para o torque em função do ângulo de giro.

5.1.3 - Determinação do Número de Swirl (S)

De posse das curvas de calibração dos fios de aço, foi possível obter o Número de Swirl em função do Número de Reynolds do jato e da posição da câmara geradora, para todas as situações ensaiadas e mostradas no item 5.1.1. Os resultados destas correlações são mostrados nas figuras 5.6 a 5.8, para os três tubos estudados.

Nestas curvas é apresentado o Número de Swirl em função de Re_{Dt} , para diversas intensidades do escoamento espiralado, conseguidas com a variação da posição adimensional da câmara geradora dada por L/Dt .

Uma observação geral das figuras mostra que o Número de Swirl cresce com a diminuição de L/Dt para um mesmo número de Reynolds, como seria esperado, pois os menores valores de L/Dt estão associados a maior intensidade do escoamento circunferencial que entra no tubo do jato na câmara geradora de Swirl. As figuras mostram também um aumento do Número de Swirl com o aumento do número de Reynolds do jato para uma mesma posição da câmara geradora. Este aumento é mais pronunciado para os valores mais baixos da faixa do número de Reynolds investigada, apresentando uma tendência a assintotização dos valores a medida que o número de Reynolds é aumentado. A confirmação desta tendência exigiria experimentos com números de Reynolds superiores àqueles possíveis com a seção de testes construída.

Deve ser ressaltado na análise das figuras 5.6 a 5.8 o pequeno espalhamento dos dados do número de Swirl apresentados. Este pequeno espalhamento atesta a qualidade do projeto e construção da seção de testes utilizada para a medição do número de Swirl.

Figura 5.6 - Número de Swirl x Reynolds do Jato - Tubo 9.0mm

Figura 5.7 - Número de Swirl x Reynolds do Jato - Tubo 13.2mm

Figura 5.8 - Número de Swirl x Reynolds do Jato - Tubo 22.0mm

Técnicas alternativas, tais como a medição do ângulo traçado na parede interna de tubos por gotas de tinta injetadas utilizada por Chaboki [02], foram tentadas sem sucesso, produzindo espalhamento de dados inaceitáveis e comportamentos fisicamente absurdos.

A partir destas figuras, e visando utilizar Números de Swirl que cobrissem toda a sua faixa de classificação (fraco, moderado e forte), foram escolhidos os seguintes valores para caracterizar a intensidade do escoamento espiralado nos experimentos de troca de massa:

Tabela 5.1 - Valores Característicos do Número de Swirl

Número de Swirl Fraco	0.28
Número de Swirl Moderado	0.54
Número de Swirl Forte	0.74

5.2 - Resultados de Transferência de Massa

Neste ítem serão apresentados os resultados para os experimentos de transferência de massa realizados. A subdivisão deste ítem visa facilitar o entendimento e a distinção dos diversos ensaios efetuados. Os resultados a serem apresentados foram obtidos para números de Reynolds do jato iguais a 9000, 18000, 27000, 36000 e 45000. Para cada valor do número de Reynolds, foram investigados três valores da distância adimensional jato/placa ($H/Dt = 2, 4$ e 8), e três valores da intensidade do escoamento espiralado caracterizados pelo número de Swirl ($S = 0.28, 0.54$ e 0.74). Ao todo foram realizados 60 experimentos de transferência de massa.

5.2.1 - Caso Base - Jato não Espiralado

Com o objetivo de obter-se uma configuração que possibilitasse uma avaliação da influência do escoamento espiralado na troca de massa, foram realizados experimentos para a configuração formada por um jato incidente não espiralado. Os resultados obtidos para este caso, denominado caso base, são apresentados nas figuras 5.9, 5.10 e 5.11. Por se tratar de uma configuração já estudada na literatura, o caso base serviu também para uma qualificação dos procedimentos experimentais utilizados.

Distribuição Radial do Número de Sherwood Local

Nas figuras 5.9, 5.10 e 5.11 são apresentados os resultados para o número de Sherwood local obtidos para o caso base. Estes resultados foram obtidos utilizando-se o tubo de 9mm de diâmetro, visando-se estender a faixa de variação do adimensional r/Dt . As figuras 5.9 a 5.11 apresentam o número de Sherwood local Sh_l , em função da posição radial adimensional r/Dt . A posição $r/Dt = 0$ corresponde ao centro da placa. Cada curva nas figuras representa um valor do número de Reynolds do jato, como indicado na legenda.

No caso de uma pequena distância adimensional jato/placa como aquela representada na figura 5.9, a forma da distribuição do número de Sherwood local é bastante característica do padrão do escoamento que prevalece, estando de acordo com os trabalhos da literatura [05]. De fato, para estas pequenas distâncias jato/placa, existe uma região central de estagnação do escoamento que produz elevados valores do número de Sherwood local, seguida de uma brusca queda nas taxas de transferência de massa e uma posterior recuperação. Este padrão de transferência de massa local é consequência de um descolamento do escoamento da placa e de um posterior recolamento. A partir do ponto de recolamento do escoamento (aproximadamente em $r/Dt = 2.5$ na figura) o número de Sherwood local decresce monotonicamente caracterizando um aumento na espessura da camada limite, típica de escoamentos paralelos sobre placas planas. Alguns autores sugerem que o aparecimento de máximos secundários está relacionado com a transição laminar/turbulenta da camada limite na parede do jato. [03,22,31].

Os resultados da figura indicam que o comportamento descrito da distribuição radial do número de Sherwood local é semelhante para todos os valores do número de Reynolds investigados. A influência do número de Reynolds se verifica nos valores absolutos do número de Sherwood assim como nos valores relativos de uma região para outra.

É importante notar que as posições radiais dos pontos de descolamento e recolamento do escoamento são praticamente independentes do número de Reynolds.

Uma análise da configuração com $H/Dt = 4$ mostrada na figura 5.10, revela as mesmas características qualitativas descritas com relação ao caso onde $H/Dt = 2$. Pode ser observado no entanto que o afastamento do jato atenuou as variações do número de Sherwood local. Para o caso de Reynolds mais baixos a presença do ponto de máximo secundário na distribuição do número de Sherwood não é mais notada, dando lugar a um decaimento monotônico da troca de massa com a distância radial. Esta tendência é confirmada com o aumento da distância do jato à placa como mostrado na figura 5.11. Nota-se nesta figura, para $H/Dt = 8$, a ausência dos pontos de máximo secundário na distribuição.

Uma análise conjunta das figuras 5.9, 5.10 e 5.11 mostra que o valor médio do número de Sherwood local é uma função forte do número de Reynolds e fraca da distância

adimensional jato/placa. Além disso, pode ser notado que o valor do número de Sherwood no ponto de estagnação é praticamente independente da distância do jato à placa.

Figura 5.9 - Distribuição Radial de Sherwood Local para $H/Dt = 2$

Figura 5.10 - Distribuição Radial de Sherwood Local para $H/Dt = 4$

Figura 5.11 - Distribuição Radial de Sherwood Local para $H/Dt = 8$

Resultados Para Sherwood Médio

As figuras 5.12 a 5.14 mostram os resultados para o número de Sherwood médio, Sh_m , em função do número de Reynolds, Re_{Dt} , para os diversos valores de H/Dt . De modo a permitir uma comparação dos resultados do presente trabalho, nestas figuras também são apresentadas curvas representando a seguinte correlação proposta por Martin [05]:

$$\left(\frac{Sh_m}{Sc^{0.42}} \right) = \frac{D}{r} \frac{1 - 1.1D/r}{1 + 0.1(H/D - 6)D/r} F(Re) \quad (5.1)$$

onde:

$$\begin{aligned} 2000 < Re < 30000 & \Rightarrow F(Re) = 1.360 (Re)^{0.574} \\ 30000 < Re < 120000 & \Rightarrow F(Re) = 0.540 (Re)^{0.667} \\ 120000 < Re < 400000 & \Rightarrow F(Re) = 0.151 (Re)^{0.775} \end{aligned}$$

Pode ser observado nestas figuras que os valores médios obtidos no presente trabalho através da pesagem dos cassetes de naftaleno são bastante próximos dos valores propostos por Martin.

Figura 5.12 - Comparação entre os Valores de Sherwood Médio

Figura 5.13 - Comparação entre os Valores de Sherwood Médio

Figura 5.14 - Comparação entre os Valores de Sherwood Médio

Os máximos desvios com relação à correlação proposta por Martin são da ordem de 9%. Ainda nas figuras, são apresentados os valores do número de Sherwood médio obtidos através da integração na área da placa dos resultados de Sherwood local, conforme procedimento descrito na seção 4.5. A maior discrepância dos resultados provenientes dos experimentos com a mesa de coordenadas e da pesagem nunca foi superior a 8%, tendo se mantido, em média, em torno de 5%.

A boa concordância destes resultados com os experimentos de pesagem e com os resultados de Martin, atestam a qualidade dos experimentos realizados.

5.2.2 - Resultados para Jatos Espiralados

Distribuição Radial do Número de Sherwood Local

Neste item são apresentados os resultados de transferência de massa na forma do número de Sherwood local para ensaios com jato espiralado. A apresentação está estruturada

de forma a enfatizar o efeito na transferência de massa, da intensidade do escoamento espiralado, da distância jato/placa e do número de Reynolds. Para isto cada resultado é apresentado em conjunto com os dados do caso base correspondente.

Antes de iniciarmos a apresentação dos resultados é interessante uma descrição qualitativa das características do escoamento de um jato espiralado. A imposição de um componente circunferencial em um escoamento de jato livre altera significativamente a estrutura do jato. A medida que a intensidade do escoamento espiralado é aumentada, as taxas de espalhamento do jato, a de "entrainment" e de decaimento da velocidade axial aumentam [03]. Os efeitos centrípetos do escoamento espiralado produzem um gradiente de pressão adverso ao longo do eixo do jato que provoca uma diminuição na velocidade axial na linha de centro. Dependendo da intensidade do escoamento espiralado, pode-se obter reversão do escoamento. O perfil de velocidade do jato se modifica de uma curva do tipo gaussiana para uma curva apresentando dois picos em posições radiais aproximadamente iguais ao raio do tubo.

É de se esperar, portanto, que estas alterações no campo de velocidade produzam efeitos na troca de massa. Realmente, como poderá ser visto a seguir, estes efeitos foram documentados nos experimentos de transferência de massa realizados.

Os resultados de transferência de massa são mostrados nas figuras 5.15 a 5.29, onde o número de Sherwood local é apresentado em função da posição radial adimensional r/D_t , para os cinco valores do número de Reynolds investigados. Cada figura é caracterizada por um valor do número de Reynolds e da distância jato/placa, H/D_t . Para cada par destes valores são apresentados resultados para três valores do número de Swirl, assim como o caso base correspondente.

As figuras 5.15, 5.16 e 5.17, apresentam os resultados para baixos valores do número de Reynolds ($Re_{D_t} = 9000$). Nestas figuras pode-se observar que, enquanto a distribuição radial do número de Sherwood é apresentada até uma posição $r/D_t \approx 7.5$ para o caso base e o caso onde $S = 0.28$, os casos correspondentes a $S = 0.54$ e $S = 0.74$ são apresentados até $r/D_t \approx 5$ e $r/D_t \approx 3$, respectivamente. Isto se deveu a utilização de três tubos do jato com diâmetros diferentes nos experimentos.

Figura 5.15 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 9000$, $H/Dt = 2$

Figura 5.16 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 9000$, $H/Dt = 4$

Figura 5.17 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 9000$, $H/Dt = 8$

Uma vez que a placa de naftaleno possuía diâmetro fixo, os experimentos com tubo de menor diâmetro permitiam que se investigasse regiões de maior r/Dt . A razão para utilizar-se tubos com maior diâmetro, limitando portanto a coordenada adimensional máxima investigada, estava relacionada com a impossibilidade da seção de testes construída em gerar números de Swirl elevados para tubos de pequeno diâmetro. Valores do número de Swirl elevados só puderam ser atingidos com tubos de maior diâmetro. Deve ser ressaltado que nas figuras apresentadas todas as curvas possuem o mesmo número de pontos medidos na direção radial.

Uma inspeção geral das figuras 5.15 a 5.17 mostra que o efeito preponderante da presença do escoamento espiralado é no sentido de diminuir o número de Sherwood local em comparação com o caso base onde o escoamento não é espiralado. Para as pequenas e médias distâncias jato/placa ($H/Dt = 2$ e 4) o comportamento das distribuições do número de Swirl é semelhante. Nota-se uma forte redução do número de Sherwood na região de estagnação seguida de uma recuperação e um comportamento assintótico tendendo para os valores de

Sherwood do caso base. Os resultados mostrados nas figuras 5.15 e 5.16 estão de acordo com a descrição feita anteriormente sobre os efeitos do escoamento espiralado no perfil de velocidade do jato. Enquanto no caso base o ponto de velocidade máxima coincidia com a linha de centro provocando altos valores de Sh_l , a presença do escoamento espiralado desloca o ponto de velocidade máxima para posições radiais aproximadamente iguais ao raio do tubo, além de produzir uma redução ou até reversão do escoamento na linha centro. A redução de Sh_l na linha de centro assim como os picos na distribuição em torno de $r/Dt = 1$ são o reflexo da nova configuração do perfil de velocidade.

Para verificar o comportamento descrito do perfil de velocidade do jato espiralado foram realizados alguns experimentos de visualização empregando-se a técnica de óleo com negro de fumo. Nesta técnica a mistura de óleo com negro de fumo é espalhada sobre uma placa de acrílico coberta com papel adesivo branco e colocada no lugar da placa de naftaleno na seção de testes. A tensão cisalhante imposta pelo escoamento junto à placa movimenta o filme de óleo deixando aparecer o fundo branco da placa nas regiões de alta tensão cisalhante e prevalecendo a coloração escura nas regiões de baixa tensão. Assim, é possível obter-se uma clara imagem do escoamento junto à placa que, em última análise, determina as taxas de transferência de massa.

A realização destes experimentos confirmou a presença de escoamento reverso na região de estagnação para altos valores do número de Swirl. Também foi possível verificar uma zona circular de separação do escoamento que definia duas regiões distintas. Do centro da placa ao início da região de separação ($r/Dt \approx 1$) era visível a influência do escoamento espiralado curvando as trajetórias das partículas de óleo/negro de fumo. Fora da região ($r/Dt > 2$) era praticamente impossível distinguir-se qualquer movimento curvo das partículas, sendo observadas trajetórias praticamente radiais.

A medida que o jato é afastado da placa, a distribuição de Sherwood local é alterada em alguns aspectos. Como pode ser observado os picos na região $r/Dt = 1$ presentes para o caso de menor H/Dt , não são mais notados para baixos valores de S e apresentam-se bastante atenuados para valores maiores de S . A drástica redução de Sh na região de estagnação e a tendência a assintotização para os valores do caso base continuam presentes.

Para números de Reynolds intermediários ($Re_{Dt} = 18000$ e 27000) a tendência geral de diminuição do número de Sherwood com a presença do escoamento espiralado é mantida. No entanto nota-se que a diminuição do número de Sherwood na região de estagnação não é tão pronunciada como no caso de baixos Reynolds, indicando que a quantidade de movimento linear do jato foi aumentada em comparação com o gradiente de pressão adverso gerado pelo escoamento espiralado, de forma a não provocar reduções tão drásticas na velocidade axial do fluido nesta região. Pode-se notar também nas figuras 5.18 a 5.23 que o efeito do escoamento espiralado é sentido em regiões mais afastadas radialmente.

No caso dos números de Reynolds mais elevados investigados, mostrados nas figuras 5.24 a 5.29, pode-se observar o mesmo comportamento qualitativo descrito para os outros valores de Reynolds. Uma comparação de casos com a mesma distância jato/placa e diferentes números de Reynolds mostra que quanto maior o número de Reynolds maior o número de Swirl necessário para alterar a forma da distribuição local de Sherwood.

Figura 5.18 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 18000$, $H/Dt = 2$

Figura 5.19 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 18000$, $H/Dt = 4$

Figura 5.20 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 18000$, $H/Dt = 8$

Figura 5.21 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 27000$, $H/Dt = 2$

Figura 5.22 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 27000$, $H/Dt = 4$

Figura 5.23 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 27000$, $H/Dt = 8$

Figura 5.24 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 36000$, $H/Dt = 2$

Figura 5.25 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 36000$, $H/Dt = 4$

Figura 5.26 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 36000$, $H/Dt = 8$

Figura 5.27 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 45000$, $H/Dt = 2$

Figura 5.28 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 45000$, $H/Dt = 4$

Figura 5.29 - Distribuição Radial de Sh_l para $Re_{Dt} = 45000$, $H/D_t = 8$

Resultados Para Sherwood Médio

A seguir são apresentados os resultados de Sherwood médio obtidos nos experimentos em que havia o espiralamento do jato. Os valores de Sherwood são mostrados em função do número de Reynolds para os diversos valores de H/D_t e para cada um dos valores do número de Swirl utilizados neste trabalho.

Estes resultados são mostrados nas figuras 5.30 a 5.32, e uma observação destas figuras demonstra que os valores de Sherwood médio também caem com o aumento do grau do espiralamento do jato. Esta observação concorda com a conclusão obtida para os valores locais do número de Sherwood.

Figura 5.30 - Sherwood Local Médio x Número de Reynolds, $H/Dt = 2$

Figura 5.31 - Sherwood Local Médio x Número de Reynolds, $H/Dt = 4$

Figura 5.32 - Sherwood Local Médio x Número de Reynolds, $H/Dt = 8$

CAPÍTULO 06

CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou experimentalmente a transferência de massa para jatos turbulentos espiralados incidindo ortogonalmente sobre uma superfície plana. Neste trabalho foram estudados os efeitos sobre a transferência de massa do número de Reynolds do jato, da distância jato/placa e da intensidade do escoamento espiralado dada pelo número de Swirl.

Os experimentos realizados permitiram a obtenção de informações detalhadas sobre a distribuição espacial dos coeficientes de troca de massa na superfície da placa, assim como informações sobre os coeficientes médios de troca de massa.

Os coeficientes de troca de massa foram determinados utilizando-se a técnica de sublimação de naftaleno. Na determinação dos coeficientes locais utilizou-se um sistema de medição computadorizado que realizava um levantamento das profundidades de sublimação do naftaleno ao longo da placa. Coeficientes médios de troca foram obtidos independentemente através de pesagem e da integração dos coeficientes locais.

Para caracterizar o escoamento espiralado foi especialmente construído um torquímetro de alta sensibilidade capaz de registrar a variação da quantidade de movimento angular do jato espiralado. Experimentos preliminares foram realizados com o intuito de determinar a dependência do número de Swirl do jato com o número de Reynolds, para cada configuração da câmara responsável pela geração do escoamento espiralado.

O presente trabalho inclui também a investigação da configuração formada por um jato incidente sem escoamento espiralado. Estes resultados além de terem sido utilizados como base de comparação para os efeitos dos jatos espiralados, serviram como qualificação da bancada e procedimentos experimentais desenvolvidos, visto tratar-se de um caso bem documentado na literatura. Os resultados obtidos para os coeficientes médios e locais do caso base mostraram excelente concordância com dados da literatura.

Nos experimentos realizados para o jato espiralado foram investigados números de Reynolds do jato variando entre 9000 e 45000. Para cada número de Reynolds foram

estudadas três distâncias jato/placa, correspondendo a 2, 4 e 8 diâmetros do jato. Em cada um dos casos utilizou-se três diferentes intensidades do escoamento espiralado correspondendo a três valores do número de Swirl (0.28, 0.54 e 0.74).

Os resultados obtidos revelaram que, de uma maneira geral, a presença de um componente circunferencial no escoamento do jato produz uma diminuição nos coeficientes de troca de massa, quando comparados ao caso base de escoamento não espiralado. Em particular verificou-se uma significativa diminuição do valor dos coeficientes de troca de massa na região de estagnação. Esta diminuição foi creditada a um decréscimo da velocidade axial do jato nesta região devido aos efeitos centrípetos decorrentes do espiralamento do jato. Este decréscimo na transferência de massa na região de estagnação era tanto maior quanto maior a intensidade do escoamento espiralado.

Os resultados revelaram também que para as faixas de parâmetros investigadas os efeitos do escoamento espiralado estão confinados a uma região central da placa com raio entre 1 e 3 diâmetros do jato. Nesta região a forma de distribuição radial dos coeficientes locais de troca de massa é bastante alterada principalmente para os casos de baixo números de Reynolds e alta intensidade do escoamento espiralado. Fora desta região os resultados para os coeficientes locais se aproximam bastante dos resultados do caso base.

Os coeficientes médios de troca de massa apresentaram também diminuição em relação ao caso base.

Devido à limitação de tempo, o trabalho realizado investigou os efeitos do escoamento espiralado para uma faixa restrita de parâmetros. Em particular recomenda-se para trabalhos futuros uma investigação abrangendo as pequenas distâncias jato/placa, onde, para o caso de escoamento não espiralado, a literatura mostra grandes aumentos de transferência de massa para a região de estagnação. Recomenda-se também a realização de experimentos detalhados de visualização de escoamento para permitir uma melhor compreensão dos resultados obtidos para transferência de massa.

APÊNDICE I

CÁLCULO DA VAZÃO DE AR

Para ajustar-se o Número de Reynolds desejado em cada corrida experimental era preciso ter conhecimento do valor do fluxo de massa. Isto era feito mediante o uso de placa de orifício inserida em um trecho da tubulação.

A instalação e o posicionamento desta placa obedecem às recomendações da ASME [14], e podem ser vistas na Figura A1.1.

Como desejava-se obter uma variada faixa do Número de Reynolds, duas placas de latão e uma de alumínio, com espessura de 1/8 de polegada, foram utilizadas no decorrer do experimento.

Os flanges e a tubulação foram construídos em PVC, enquanto que nos tubos das tomadas de pressão foi utilizado latão. Os comprimentos de trecho reto de tubulação a montante e a jusante da placa são de 1300 e 350 mm respectivamente, os quais atendem perfeitamente às recomendações da ASME.

Na tabela A1.1 podem ser vistas algumas informações sobre as placas utilizadas, e observa-se também nesta tabela o cuidado tomado com a faixa de utilização das placas de orifício para evitar uma elevada perda de carga.

Tabela A1.1 - Placas de Orifício Utilizadas

Placas de Orifício			
d (mm)	β	Faixa de Aplicação	Material
10.1	0.2012	$Re_{dt} \leq 20.000$	Latão
15.6	0.3108	$20.000 < Re_{dt} \leq 45.000$	Alumínio
37.0	0.7372	$Re_{dt} > 45.000$	Latão

Nos tubos das tomadas de pressão acoplavam-se mangueiras plásticas que por sua vez estavam conectadas a dois manômetros de tubo em U, de modo que um deles fornecia o

diferencial de pressões a montante e a jusante da placa ($p_1 - p_2$), e o outro fornecia a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão a montante da placa ($p_{atm} - p_1$).

A partir das leituras obtidas nos manômetros citados, era possível determinar-se o Número de Reynolds por meio de um programa que foi desenvolvido no início deste trabalho, e que seguia um roteiro de cálculo recomendado pelas normas da ASME.

É apresentado a seguir uma síntese do que era calculado neste programa. A vazão mássica era calculada por:

$$\dot{W} = KYF_a A_d \sqrt{2\rho_{ar} \Delta P} \quad (A1.1)$$

onde:

$\dot{W}$ = Fluxo de massa [Kg/s]

A_d = Área de escoamento do orifício [m²]

$\Delta P = (p_1 - p_2)$ [Pa]

Nesta expressão, o fator de expansão da área do escoamento (F_a) foi considerado como sendo constante e igual a 1, já que a temperatura ambiente estava entre 19 e 21°C.

Durante a conversão de unidades das leituras dos manômetros, de mmH₂O para Pascal, utiliza-se a expressão A2.3 do Apêndice II para determinar-se a massa específica do fluido manométrico.

Y também é um fator de expansão e é dado por

$$Y = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \cdot \frac{\Delta P}{\gamma p_1} \quad (A1.2)$$

onde $\gamma = 1.4$ com a hipótese de que o ar é um gás ideal.

Utiliza-se a equação dos gases perfeitos para se determinar a massa específica do ar em Kg/m³

$$\rho_{ar} = Z \frac{p_1 M_{ar}}{RT_{ar}} \quad (A1.3)$$

Novamente utiliza-se a hipótese de gás ideal e conclui-se que $Z=1$. P_1 pode ser obtida a partir de uma das medidas dos manômetros como sendo

$$P_1 = P_{atm} - (P_{atm} - P_1) \quad (A1.4)$$

O coeficiente de descarga K é determinado pela expressão

$$K = K_o + b\lambda \quad (A1.5)$$

onde

$$K_o = (0.6014 - 0.01352d_t^{-0.25}) + \\ + (0.3760 + 0.07257d_t^{-0.25}) \cdot \left(\frac{0.00025}{d_t^2\beta^2 + 0.0025d_t} + \beta^4 + 1.5\beta^{16} \right) \quad (A1.6)$$

$$b = \left(0.0002 + \frac{0.0011}{d_t} \right) + \left(0.0038 + \frac{0.0004}{d_t} \right) (\beta^2 + (16.5 + 5d_t)\beta^{16}) \quad (A1.7)$$

$$\lambda = \frac{1000}{\sqrt{Re_{dt}}} \quad (A1.8)$$

$$Re_{dt} = \frac{4\dot{W}}{\pi d_t \mu} \quad (A1.9)$$

Sendo que nas expressões (A1.6) e (A1.7) o diâmetro da tubulação (d_t) deve ser expresso em polegadas, e a viscosidade dinâmica (μ) é obtida a partir da expressão A2.1 do Apêndice II.

Devido à interdependência de K e Re_{dt} , um processo iterativo é utilizado para calcular-se a vazão. As etapas deste processo são descritas a seguir:

- 1- Com os dados já existentes determina-se A_d , P_1 , ρ_{ar} , μ , Y e ΔP .
- 2- Arbitra-se um valor para Re_{dt} .
- 3- Calcula-se K a partir das expressões (A1.5) a (A1.8).

- 4- Obtem-se o fluxo de massa pela expressão (A1.1).
- 5- Encontra-se um novo valor para Re_{dt} e este é comparado com o Re_{dt} anterior.
- 6- Retornar ao passo 2 com o novo valor de Re_{dt} .

Este processo continuava até que o critério de convergência fosse atendido, o que não levava mais do que 10 iterações. No presente caso o critério de convergência foi : $|Re - Re_{ant}| < 0.0001$.

De posse do valor do Número de Reynolds definitivo, uma relação de diâmetros era efetuada e calculava-se o Número de Reynolds na saída do jato do presente ensaio.

$$Re_{Dt} = \frac{Re_{dt} dt}{Dt} \quad (A1.10)$$

Figura A1.1 - Instalação e Posicionamento da Placa de Orifício

APÊNDICE II

PROPRIEDADES E CONSTANTES

Neste Apêndice encontram-se diversas informações sobre as substâncias químicas envolvidas no experimento. Estes dados foram utilizados durante o transcorrer deste trabalho em várias seções do mesmo.

A2.1-Naftaleno:

Fórmula molecular:	$C_{10}H_8$
Massa molecular:	128.17
Ponto de fusão:	353.45 [K]
Ponto de ebulição:	490.65 [K]
Massa específica do sólido:	1.146×10^3 [Kg/m ³]
Coeficiente de difusão naftaleno/ar:	6.12×10^{-6} [cm ² /s] Para $p=1$ atm e $T=25^\circ\text{C}$

A2.2-Ar:

Massa molecular:	28.967
Constante universal dos gases:	8314.39 [J/Kgmol.K]

Segundo Nogueira [10], a viscosidade dinâmica do ar pode ser obtida pelo seguinte polinômio:

$$\mu_{ar} = 10^{-6} (1.16116 + 6.85625 \times 10^{-2} T_{ar} - 3.6163 \times 10^{-5} T_{ar}^2) \quad (A2.1)$$

Neste polinômio μ_{ar} é dada em [Kg/m³] e T_{ar} é a temperatura do ar em [K]. Ele nos diz que a incerteza associada à utilização deste polinômio é da ordem de 2%.

Para determinar-se a temperatura do naftaleno durante as corridas experimentais, era utilizado um termopar segundo já descrito anteriormente.

Um polinômio era usado para relacionar o sinal conseguido no multímetro com a temperatura da parede do naftaleno, conforme é visto a seguir. Este polinômio foi obtido a partir de um procedimento de calibração realizado no laboratório de termociências da PUC-Rio.

$$T_p = -0.128 + 17.195 V - 0.2581 V^2 \quad (A2.2)$$

T_p é a temperatura da parede de naftaleno em °C, enquanto V é o valor da força eletromotriz fornecida pelo multímetro em mV.

A2.3-Água:

Nogueira[10] também nos fornece o seguinte polinômio para a determinação da massa específica da água:

$$\rho_{H_2O} = 1.000529 \times 10^3 - 2.287674 \times 10^{-2} T_{ar} - 4.619005 \times 10^{-3} T_{ar}^2 \quad (A2.3)$$

ρ_{H_2O} é a massa específica da água em [Kg/m³], e o erro cometido ao se utilizar este polinômio é $\leq 0.01\%$.

Este polinômio foi utilizado como auxílio na transformação de unidades das leituras feitas com os manômetros de tubo em U.

APÊNDICE III

ANÁLISE DE INCERTEZAS

Neste apêndice é apresentado o procedimento utilizado para estimar as incertezas experimentais associadas com os experimentos realizados.

Segundo Moffat [21], a equação básica para a determinação da incerteza relacionada com o resultado final obtido para uma variável **R**, é dada por:

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A3.1)$$

onde $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, x_i são as variáveis medidas para a obtenção de **R** e δx_i são as incertezas experimentais associadas a cada uma destas variáveis.

Devido à grande quantidade de variáveis envolvidas e ao caráter iterativo de algumas equações envolvidas no tratamento dos dados, optou-se por determinar numericamente a incerteza, no mesmo programa que fazia o tratamento dos dados.

Determinar numericamente a incerteza, significa calcular as derivadas parciais de **R** em relação a x_i , dando-se um incremento a todas as variáveis igual à sua incerteza, individualmente ($x'_i = x_i + \delta x_i$), e calculando o **R_i** correspondente a x'_i .

As derivadas parciais são definidas como:

$$\frac{\partial R}{\partial x_i} = \frac{R_i - R_0}{\delta x_i} \quad (A3.2)$$

onde **R₀** é calculado sem que nenhuma das variáveis sofra qualquer incremento.

Substituindo a expressão A3.2 na A3.1, obtém-se uma expressão para a incerteza procurada:

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^n (R_i - R_0)^2 \right]^{1/2} \quad (A3.3)$$

As incertezas associadas a cada variável medida são apresentadas a seguir.

Tabela A3.1 - Incerteza das Variáveis

Variável	Símbolo	Incerteza Absoluta
Temperatura ambiente	T_{ar}	0.5°C
Pressão atmosférica	P_{atm}	0.1 mmHg
Diferença de pressão na placa de orifício	$P_1 - P_2$	1 mmH ₂ O
Diferença entre P_{atm} e a pressão a montante da placa	$P_{atm} - P_1$	0.5 mmH ₂ O
Diâmetro do tubo do sistema de exaustão	d_t	0.1 mm
Diâmetro do orifício	d	0.1 mm
Coefficiente de descarga da placa de orifício	K_o	Tabela A4.2
Massa	m	0.1mg
Temperatura da parede	T_p	0.5°C
Tempo	τ	0.01 Seg
Profundidade de sublimação	ΔY	0.5m μ
Raio do cassete	R_c	0.1 mm
Diâmetro do jato	D_t	0.1 mm

Tabela A3.2 - Incerteza no Coeficiente de Descarga da Placa de Orifício

 $dt \geq 2 \text{ pol}, Re_d \geq 5000 \text{ dt}$

$0.11 < \beta < 0.2$	$\pm 2.25\% \text{ a } 1\% *$
$0.2 < \beta < 0.7$	$\pm 1\% \text{ ou menos}$
$0.7 < \beta < 0.75$	$\pm 1\% \text{ a } 2.25\% *$

* variação linear com β

A seguir serão mostradas as incertezas obtidas para o experimento, utilizando o procedimento já descrito neste apêndice.

A tabela A3.3 apresenta os resultados obtidos para a incerteza no número de Reynolds nos 60 experimentos realizados.

A tabela A3.4 mostra as incertezas obtidas no cálculo de Sherwood médio obtidas através das pesagens. Pode-se ver claramente que os valores para as incertezas do Número de Sherwood médio são bastante satisfatórios, visto que não ultrapassam um valor de $\pm 7\%$.

Também a tabela A3.5, que mostra as incertezas para o Número de Sherwood local médio, tem valores bastante baixos o que mais uma vez fazia com que acreditássemos na confiabilidade dos resultados conseguidos ao longo do experimento. Entende-se por Número de Sherwood local médio, como sendo um número de Sherwood médio obtido a partir da integração dos valores locais, conforme descrito no Capítulo 4.

Devido a grande extensão das tabelas obtidas para a incerteza do Número de Sherwood local, optou-se por ilustrar neste trabalho alguns casos típicos dos nossos ensaios. Nas tabelas A3.6 e A3.7, são mostrados os valores das incertezas para o Número de Sherwood local para duas configurações distintas deste trabalho. As incertezas foram calculadas para cada um dos pontos visitados pelo apalpador na etapa de mapeamento. Os valores obtidos para as incertezas para estas e demais configurações foram satisfatórios, ficando sempre abaixo de 6%.

O espalhamento dos dados experimentais obtidos foi aproximadamente equivalente às previsões apresentadas neste apêndice. Isto mostra que as estimativas de incertezas experimentais foram realistas, e que os experimentos realizados estavam bem controlados.

Tabela A3.3 - Incerteza do Número de Reynolds

Reynolds	H/Dt	Nº Swirl	δRe %
9000	2	0	4.40
18000	2	0	2.85
27000	2	0	3.18
36000	2	0	2.64
45000	2	0	1.88
9000	4	0	4.22
18000	4	0	2.85
27000	4	0	3.18
36000	4	0	2.62
45000	4	0	1.88
9000	8	0	4.22
18000	8	0	2.85
27000	8	0	3.25
36000	8	0	2.62
45000	8	0	1.87
9000	2	0.28	4.22
18000	2	0.28	2.83
27000	2	0.28	3.18
36000	2	0.28	2.62
45000	2	0.28	1.88
9000	4	0.28	4.22
18000	4	0.28	2.84
27000	4	0.28	3.18
36000	4	0.28	2.66
45000	4	0.28	1.88
9000	8	0.28	4.22
18000	8	0.28	2.83
27000	8	0.28	3.18
36000	8	0.28	2.60
45000	8	0.28	1.88

Continua na página seguinte

Reynolds	H/Dt	Nº Swirl	δRe %
9000	2	0.54	3.01
18000	2	0.54	2.54
27000	2	0.54	2.38
36000	2	0.54	2.16
45000	2	0.54	4.12
9000	4	0.54	3.01
18000	4	0.54	2.54
27000	4	0.54	2.38
36000	4	0.54	2.15
45000	4	0.54	4.12
9000	8	0.54	3.01
18000	8	0.54	2.54
27000	8	0.54	2.56
36000	8	0.54	2.14
45000	8	0.54	4.12
9000	2	0.74	2.50
18000	2	0.74	2.30
27000	2	0.74	1.96
36000	2	0.74	1.89
45000	2	0.74	2.01
9000	4	0.74	2.51
18000	4	0.74	2.30
27000	4	0.74	1.96
36000	4	0.74	1.89
45000	4	0.74	2.06
9000	8	0.54	2.52
18000	8	0.74	2.30
27000	8	0.74	1.96
36000	8	0.74	1.89
45000	8	0.74	2.01

Tabela A3.4 - Incerteza de Sherwood Médio

Reynolds	H/Dt	Nº Swirl	δSh_m %
9000	2	0	6.29
18000	2	0	5.89
27000	2	0	5.73
36000	2	0	5.65
45000	2	0	5.62
9000	4	0	6.29
18000	4	0	5.84
27000	4	0	5.65
36000	4	0	5.58
45000	4	0	5.60
9000	8	0	6.04
18000	8	0	5.70
27000	8	0	5.60
36000	8	0	5.50
45000	8	0	5.60
9000	2	0.28	6.01
18000	2	0.28	5.73
27000	2	0.28	5.62
36000	2	0.28	5.61
45000	2	0.28	5.46
9000	4	0.28	5.96
18000	4	0.28	5.70
27000	4	0.28	5.59
36000	4	0.28	5.57
45000	4	0.28	5.43
9000	8	0.28	5.75
18000	8	0.28	5.56
27000	8	0.28	5.49
36000	8	0.28	5.40
45000	8	0.28	5.36

Continua na página seguinte

Reynolds	H/Dt	Nº Swirl	δSh_m %
9000	2	0.54	5.43
18000	2	0.54	5.28
27000	2	0.54	5.24
36000	2	0.54	5.26
45000	2	0.54	5.18
9000	4	0.54	5.36
18000	4	0.54	5.22
27000	4	0.54	5.21
36000	4	0.54	5.20
45000	4	0.54	5.13
9000	8	0.54	5.23
18000	8	0.54	5.10
27000	8	0.54	5.16
36000	8	0.54	5.15
45000	8	0.54	5.09
9000	2	0.74	5.09
18000	2	0.74	5.02
27000	2	0.74	5.01
36000	2	0.74	4.96
45000	2	0.74	4.91
9000	4	0.74	5.00
18000	4	0.74	4.99
27000	4	0.74	4.95
36000	4	0.74	4.93
45000	4	0.74	4.89
9000	8	0.54	4.95
18000	8	0.74	4.92
27000	8	0.74	4.85
36000	8	0.74	4.86
45000	8	0.74	4.84

Tabela A3.5 - Incerteza de Sherwood Local Médio

Reynolds	H/Dt	Nº Swirl	δSh_{lm} %
9000	2	0	5.77
18000	2	0	5.46
27000	2	0	5.13
36000	2	0	5.24
45000	2	0	5.36
9000	4	0	5.97
18000	4	0	5.56
27000	4	0	5.15
36000	4	0	5.14
45000	4	0	5.33
9000	8	0	5.89
18000	8	0	5.56
27000	8	0	5.36
36000	8	0	5.13
45000	8	0	5.18
9000	2	0.28	5.84
18000	2	0.28	5.27
27000	2	0.28	5.20
36000	2	0.28	5.17
45000	2	0.28	5.23
9000	4	0.28	5.21
18000	4	0.28	5.49
27000	4	0.28	5.16
36000	4	0.28	5.29
45000	4	0.28	5.17
9000	8	0.28	5.54
18000	8	0.28	5.21
27000	8	0.28	5.27
36000	8	0.28	5.12
45000	8	0.28	5.14

Continua na página seguinte

Reynolds	H/Dt	Nº Swirl	δSh_{lm} %
9000	2	0.54	5.15
18000	2	0.54	5.14
27000	2	0.54	5.09
36000	2	0.54	5.07
45000	2	0.54	4.98
9000	4	0.54	5.35
18000	4	0.54	5.06
27000	4	0.54	5.02
36000	4	0.54	5.17
45000	4	0.54	5.00
9000	8	0.54	6.08
18000	8	0.54	5.43
27000	8	0.54	5.06
36000	8	0.54	5.03
45000	8	0.54	5.03
9000	2	0.74	5.52
18000	2	0.74	4.98
27000	2	0.74	5.19
36000	2	0.74	5.05
45000	2	0.74	4.96
9000	4	0.74	5.68
18000	4	0.74	5.05
27000	4	0.74	5.12
36000	4	0.74	5.05
45000	4	0.74	5.05
9000	8	0.54	7.58
18000	8	0.74	5.26
27000	8	0.74	5.13
36000	8	0.74	5.15
45000	8	0.74	5.07

Tabela A3.6 - Incerteza de Sherwood Local
Re = 45000, H/Dt = 4, S = 0

Nº ponto	δSh_l %	Nº ponto	δSh_l %	Nº ponto	δSh_l %
1.00	4.31	31.00	2.15	61.00	1.51
2.00	4.20	32.00	2.08	62.00	1.47
3.00	4.06	33.00	2.02	63.00	1.43
4.00	3.97	34.00	1.96	64.00	1.39
5.00	3.89	35.00	1.93	65.00	1.34
6.00	3.76	36.00	1.89	66.00	1.36
7.00	3.73	37.00	1.82	67.00	1.37
8.00	3.66	38.00	1.81	68.00	1.37
9.00	3.59	39.00	1.75	69.00	1.36
10.00	3.44	40.00	1.73	70.00	1.35
11.00	3.41	41.00	1.68	71.00	1.36
12.00	3.31	42.00	1.65	72.00	1.38
13.00	3.21	43.00	1.63	73.00	1.40
14.00	3.19	44.00	1.60	74.00	1.44
15.00	3.10	45.00	1.55	75.00	1.48
16.00	3.01	46.00	1.53	76.00	1.53
17.00	2.96	47.00	1.51	77.00	1.59
18.00	2.88	48.00	1.48	78.00	1.62
19.00	2.83	49.00	1.47	79.00	1.63
20.00	2.76	50.00	1.47	80.00	1.62
21.00	2.69	51.00	1.46	81.00	1.61
22.00	2.62	52.00	1.48	82.00	1.58
23.00	2.58	53.00	1.51	83.00	1.53
24.00	2.50	54.00	1.54	84.00	1.52
25.00	2.44	55.00	1.57	85.00	1.50
26.00	2.40	56.00	1.59	86.00	1.51
27.00	2.33	57.00	1.61	87.00	1.51
28.00	2.30	58.00	1.62	88.00	1.52
29.00	2.22	59.00	1.60	89.00	1.55
30.00	2.18	60.00	1.56	90.00	1.57

Continua na página seguinte

Nº ponto	δShl %	Nº ponto	δShl %	Nº ponto	δShl %
91.00	1.60	121.00	3.09	151.00	3.34
92.00	1.63	122.00	3.19	152.00	3.30
93.00	1.67	123.00	3.22	153.00	3.18
94.00	1.69	124.00	3.32	154.00	3.14
95.00	1.74	125.00	3.35	155.00	3.10
96.00	1.78	126.00	3.38	156.00	3.02
97.00	1.82	127.00	3.42	157.00	2.99
98.00	1.88	128.00	3.49	158.00	2.88
99.00	1.92	129.00	3.56	159.00	2.82
100.00	1.96	130.00	3.60	160.00	2.73
101.00	2.03	131.00	3.67	161.00	2.70
102.00	2.06	132.00	3.71	162.00	2.64
103.00	2.13	133.00	3.75	163.00	2.58
104.00	2.17	134.00	3.79	164.00	2.51
105.00	2.19	135.00	3.84	165.00	2.48
106.00	2.27	136.00	4.39	166.00	2.41
107.00	2.30	137.00	4.37	167.00	2.37
108.00	2.36	138.00	4.24	168.00	2.27
109.00	2.40	139.00	4.12	169.00	2.23
110.00	2.45	140.00	4.06	170.00	2.15
111.00	2.54	141.00	4.06	171.00	2.10
112.00	2.58	142.00	4.00	172.00	2.07
113.00	2.65	143.00	3.89	173.00	1.99
114.00	2.69	144.00	3.83	174.00	1.94
115.00	2.77	145.00	3.73	175.00	1.92
116.00	2.82	146.00	3.67	176.00	1.87
117.00	2.87	147.00	3.62	177.00	1.82
118.00	2.95	148.00	3.62	178.00	1.79
119.00	2.98	149.00	3.48	179.00	1.74
120.00	3.04	150.00	3.43	180.00	1.70

Continua na página seguinte

Nº ponto	δShl %	Nº ponto	δShl %	Nº ponto	δShl %
181.00	1.67	211.00	1.64	241.00	2.56
182.00	1.63	212.00	1.70	242.00	2.62
183.00	1.60	213.00	1.76	243.00	2.70
184.00	1.56	214.00	1.76	244.00	2.74
185.00	1.55	215.00	1.75	245.00	2.83
186.00	1.55	216.00	1.70	246.00	2.97
187.00	1.56	217.00	1.67	247.00	3.01
188.00	1.59	218.00	1.61	248.00	3.05
189.00	1.66	219.00	1.59	249.00	3.13
190.00	1.70	220.00	1.58	250.00	3.26
191.00	1.76	221.00	1.57	251.00	3.30
192.00	1.77	222.00	1.60	252.00	3.31
193.00	1.73	223.00	1.60	253.00	3.40
194.00	1.70	224.00	1.62	254.00	3.50
195.00	1.64	225.00	1.65	255.00	3.60
196.00	1.59	226.00	1.68	256.00	3.65
197.00	1.53	227.00	1.73	257.00	3.76
198.00	1.49	228.00	1.77	258.00	3.82
199.00	1.45	229.00	1.82	259.00	3.88
200.00	1.45	230.00	1.86	260.00	3.94
201.00	1.43	231.00	1.92	261.00	4.07
202.00	1.42	232.00	1.99	262.00	4.13
203.00	1.41	233.00	2.06	263.00	4.14
204.00	1.42	234.00	2.08	264.00	4.20
205.00	1.41	235.00	2.18	265.00	4.34
206.00	1.41	236.00	2.25	266.00	4.34
207.00	1.43	237.00	2.32	267.00	4.42
208.00	1.47	238.00	2.34	268.00	4.49
209.00	1.51	239.00	2.41	269.00	4.42
210.00	1.57	240.00	2.50	270.00	4.58

Tabela A3.7 - Incerteza de Sherwood Local
Re = 45000, H/Dt = 2, S = 0.54

Nº ponto	δSh_l %	Nº ponto	δSh_l %	Nº ponto	δSh_l %
1.00	2.14	31.00	1.21	61.00	0.92
2.00	2.09	32.00	1.18	62.00	0.91
3.00	2.06	33.00	1.16	63.00	0.91
4.00	2.02	34.00	1.14	64.00	0.91
5.00	1.99	35.00	1.11	65.00	0.89
6.00	1.95	36.00	1.09	66.00	0.89
7.00	1.91	37.00	1.08	67.00	0.89
8.00	1.87	38.00	1.07	68.00	0.88
9.00	1.84	39.00	1.05	69.00	0.88
10.00	1.81	40.00	1.03	70.00	0.89
11.00	1.78	41.00	1.03	71.00	0.89
12.00	1.73	42.00	1.01	72.00	0.90
13.00	1.71	43.00	1.00	73.00	0.90
14.00	1.67	44.00	0.98	74.00	0.90
15.00	1.64	45.00	0.99	75.00	0.91
16.00	1.61	46.00	0.98	76.00	0.91
17.00	1.58	47.00	0.98	77.00	0.92
18.00	1.55	48.00	0.99	78.00	0.93
19.00	1.52	49.00	0.99	79.00	0.94
20.00	1.48	50.00	1.00	80.00	0.96
21.00	1.47	51.00	1.01	81.00	0.97
22.00	1.43	52.00	1.02	82.00	0.98
23.00	1.41	53.00	1.00	83.00	0.99
24.00	1.38	54.00	0.99	84.00	0.99
25.00	1.35	55.00	0.98	85.00	0.99
26.00	1.32	56.00	0.96	86.00	0.98
27.00	1.30	57.00	0.94	87.00	0.97
28.00	1.27	58.00	0.94	88.00	0.96
29.00	1.25	59.00	0.93	89.00	0.96
30.00	1.23	60.00	0.91	90.00	0.96

Continua na página seguinte

Nº ponto	δShl %	Nº ponto	δShl %	Nº ponto	δShl %
91.00	0.97	121.00	1.48	151.00	1.62
92.00	0.97	122.00	1.50	152.00	1.60
93.00	0.98	123.00	1.52	153.00	1.57
94.00	0.99	124.00	1.55	154.00	1.54
95.00	0.99	125.00	1.57	155.00	1.50
96.00	1.01	126.00	1.59	156.00	1.47
97.00	1.01	127.00	1.62	157.00	1.45
98.00	1.03	128.00	1.64	158.00	1.43
99.00	1.05	129.00	1.66	159.00	1.38
100.00	1.06	130.00	1.68	160.00	1.37
101.00	1.08	131.00	1.71	161.00	1.35
102.00	1.10	132.00	1.73	162.00	1.32
103.00	1.12	133.00	1.75	163.00	1.29
104.00	1.13	134.00	1.78	164.00	1.26
105.00	1.15	135.00	1.81	165.00	1.24
106.00	1.18	136.00	2.14	166.00	1.22
107.00	1.18	137.00	2.09	167.00	1.19
108.00	1.22	138.00	2.07	168.00	1.18
109.00	1.23	139.00	2.04	169.00	1.15
110.00	1.25	140.00	2.00	170.00	1.13
111.00	1.27	141.00	1.95	171.00	1.11
112.00	1.29	142.00	1.93	172.00	1.09
113.00	1.31	143.00	1.88	173.00	1.08
114.00	1.33	144.00	1.85	174.00	1.06
115.00	1.35	145.00	1.84	175.00	1.05
116.00	1.37	146.00	1.80	176.00	1.03
117.00	1.39	147.00	1.75	177.00	1.02
118.00	1.42	148.00	1.73	178.00	1.01
119.00	1.44	149.00	1.69	179.00	1.00
120.00	1.45	150.00	1.66	180.00	1.00

Continua na página seguinte

Nº ponto	δShl %	Nº ponto	δShl %	Nº ponto	δShl %
181.00	1.00	211.00	0.93	241.00	1.24
182.00	1.00	212.00	0.93	242.00	1.27
183.00	1.00	213.00	0.95	243.00	1.29
184.00	1.01	214.00	0.96	244.00	1.31
185.00	1.02	215.00	0.98	245.00	1.34
186.00	1.03	216.00	1.00	246.00	1.36
187.00	1.04	217.00	1.02	247.00	1.38
188.00	1.03	218.00	1.03	248.00	1.43
189.00	1.01	219.00	1.03	249.00	1.46
190.00	1.00	220.00	1.02	250.00	1.48
191.00	0.97	221.00	1.01	251.00	1.50
192.00	0.95	222.00	0.99	252.00	1.53
193.00	0.94	223.00	0.98	253.00	1.56
194.00	0.93	224.00	0.98	254.00	1.59
195.00	0.92	225.00	0.98	255.00	1.62
196.00	0.91	226.00	0.99	256.00	1.67
197.00	0.92	227.00	1.00	257.00	1.70
198.00	0.91	228.00	1.00	258.00	1.73
199.00	0.91	229.00	1.01	259.00	1.77
200.00	0.90	230.00	1.03	260.00	1.79
201.00	0.90	231.00	1.04	261.00	1.82
202.00	0.89	232.00	1.05	262.00	1.86
203.00	0.89	233.00	1.07	263.00	1.90
204.00	0.89	234.00	1.09	264.00	1.93
205.00	0.90	235.00	1.11	265.00	1.96
206.00	0.91	236.00	1.12	266.00	2.00
207.00	0.91	237.00	1.15	267.00	2.04
208.00	0.92	238.00	1.18	268.00	2.06
209.00	0.92	239.00	1.20	269.00	2.10
210.00	0.92	240.00	1.21	270.00	2.13

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] P. R. Souza Mendes, *The Naphthalene Sublimation Technique*, Experimental Thermal and Fluid Science, 1991, pp. 510-523.
- [02] E. M. Sparrow and A. Chaboki, *Swirl-Affected Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer in a Circular Tube*, J. Heat Transfer, 1984, vol 106, pp. 766-773.
- [03] J. Ward and M. Mahmood, *Heat Transfer from a Turbulent, Swirling, Impinging Jet*, Proc. 7th Int. Heat Transfer Conference, 1982, pp. 401-408.
- [04] H. Martin, *Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces*, Advances in Heat Transfer, 1977, pp. 1-60.
- [05] B. L. Button and J. M. Rhine, *A Comparison of Two Swirl Measurement Techniques*, Experimental Thermal and Fluid Science, 1993, pp. 5-14.
- [06] N. A. Chigier and J. M. Beér, *Velocity and Static Pressure Distributions in Swirling Air Jets Issuing from Annular and Divergent Nozzles*, J. Basic Eng., 1964, pp. 788-796.
- [07] N. A. Chigier and A. Chervinsky, *Experimental Investigation of Swirling Vortex Motion in Jets*, Journal of Applied Mechanics, 1967, pp. 443-451.
- [08] Cláudio M. P. Cunha, *Desenvolvimento de Algoritmo Numérico para Comando da Mesa de Coordenadas*, Relatório de Bolsa de Iniciação Científica, Depto Eng. Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1989.
- [09] Al Shenk, *Cálculo e Geometria Analítica*, 1984.
- [10] Antônio Carlos R. Nogueira, *"Transferência de Calor para Escoamento Espiralado Turbulento em Dutos Retangulares"*, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1991.
- [11] J. Stevens and B. W. Webb, *The Effect of Inclination on Local Heat Transfer under an Axisymmetric, Free Liquid Jet*, Int. J. Heat Mass Transfer, 1990.
- [12] F. Kreith and O. Sonju, *The Decay of a Turbulent Swirl in a Pipe*, J. Fluid Mechanics, 1965, pp. 257-271.
- [13] E. Smithberg and F. Landis, *Friction and Forced Convection Heat-Transfer Characteristics in Tubes with Twisted Tape Swirl Generators*, J. Heat Transfer, 1986, pp. 39-49.
- [14] ASME, *"Fluid Meters, Their Theory and Application"*, 1971.
- [15] Jonh B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 1988.
- [16] N. A. Chigier and J. M. Beér, *Combustion Aerodynamics*, 1964.
- [17] N. Rajaratnam, *Turbulent Jets*, 1976.

- [18] Geraldo Avila, *Cálculo 1: Funções de uma Variável*, 1981.
- [19] Manual Técnico da Balança Sartorius, Modelo 2400, 1968.
- [20] Manual de Operação do Processador de Sinal Diadur, Modelo ID 1200.
- [21] Robert J. Moffat, *Describing the Uncertainties in Experimental Results*, Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, pp. 3-17.
- [22] J. Stevens e B. W. Webb, *Local Heat Transfer Coefficients Under an Axisymmetric, Single-Phase Liquid Jet*, Journal of Heat Transfer, 1991, pp. 71-78.
- [23] S. J. Downs e E. H. James, *Jet Impingement Heat Transfer - A Literature Survey*, ASME Paper Nº 87-HT-35, ASME, 1987.
- [24] D. A. Zumbrennen and M. Aziz, *Convective Heat Transfer Enhancement Due to Intermittency in an Impinging Jet*, Journal of Heat Transfer, 1993, pp. 91-98.
- [25] Xin Liu, L. A. Gabour, e J. H. Lienhard V, *Stagnation-Point Heat Transfer During Impingement of Laminar Liquid Jets: Analysis Including Surface Tension*, Journal of Heat Transfer, 1993, pp. 99-105.
- [26] D. J. Womac, S. Ramadhyani e F. P. Incropera, *Correlating Equations for Impingement Cooling of Small Heat Sources With Single Circular Liquid Jets*, Journal of Heat Transfer, 1993, pp. 106-115.
- [27] S. J. Slayzak, R. Viskanta e F. P. Incropera, *Effects of Interactions Between Adjoining Rows of Circular, Free-Surface Jets on Local Heat Transfer From the Impingement Surface*, Journal of Heat Transfer, 1994, pp. 88-95.
- [28] L. F. A. Azevedo, B. W. Webb e M. Queiroz, *Pulsed Air Jet Impingement Heat Transfer*, Experimental Thermal and Fluid Science, 1991.
- [29] G. L. Whidden, J. Stevens e B. W. Webb, *Heat Transfer and Flow Characteristics of Two-Dimensional Jets Impinging on Heated Protusions With Crossflow of the Spent Air*, ASME Journal Electronic Packaging.
- [30] J. Stevens e B. W. Webb, *Measurements of the Free Surface Flow Structure Under an Impinging, Free Liquid Jet*, Apresentado no 3rd ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conference, Reno NV, 1991.
- [31] D. Lytle e B. W. Webb, *Secondary Heat transfer Maxima for Air Jet Impingement at Low Nozzle-to-Plate Spacings*, Apresentado no 2nd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Iugoslávia, 1991, pp. 776-783.

- [32] D. L. Besserman, S. Ramadhyani e F. P. Incropera, *Numerical Simulation of Laminar Flow and Heat Transfer for Liquid Jet Impingement Cooling of a Circular Heat Source With Annular Collection of the Spent Fluid*, Numerical Heat Transfer, 1991, pp. 263-278.