

## 7

## Tratamento dos Dados

### 7.1. Coeficientes de Troca de Calor

O Número de Nusselt local é dado por

$$Nu(r) = \frac{h(r)d}{k} \quad (7-1)$$

onde  $h(r)$ , o coeficiente local de troca de calor é

$$h(r) = \frac{q'' - \text{perdas}}{\Delta T} = \frac{q'' - \text{perdas}}{(T(r) - T_j)} \quad (7-2)$$

$T(r)$  é a temperatura local medida por cada termopar. A temperatura do ar na saída do jato é  $T_j$ . Esta temperatura era medida com um termopar extra posicionado na entrada do tubo. Os cálculos para estimar as perdas de calor por condução na placa estão apresentados no Apêndice II. Finalmente,  $q''$  é o fluxo de calor por unidade de área dado por

$$q'' = \frac{VI}{A_s} \quad (7-3)$$

sendo  $A_s$  a área superficial da folha metálica colada sobre a placa, que funcionava como uma resistência. Como já foi explicado na seção 3.3, nas extremidades desta folha foram soldados dois fios de cobre para medir a diferença de potencial, que seria o valor de voltagem  $V$  a ser utilizado. É importante notar que a área superficial  $A_s$  que devia ser utilizada no cálculo era referente ao espaço compreendido entre esses dois fios que mediam a  $ddp$ . O valor da corrente  $I$  era lido diretamente na fonte de potência. Portanto,  $V$  e  $I$  eram respectivamente a tensão e corrente utilizadas em cada seqüência de medições.

Desta forma, o cálculo final dos valores locais de  $Nu$  é dado por:

$$Nu(r) = \frac{\left[ \left( \frac{VI}{A_s} \right) - perdas \right] \cdot d}{k \cdot (T(r) - T_j)} \quad (7-4)$$

O valor da condutividade térmica do ar utilizado foi baseado na temperatura  $T_j$ , medida com um termopar posicionado próximo à entrada do tubo.

O cálculo de incertezas relacionado à estimativa do número de Nusselt se encontra no Apêndice I.

## 7.2. Campo de Velocidades

Para calcular as grandezas estatísticas desejadas, foi conduzido um pós-processamento dos dados sobre os campos de velocidade instantâneos. Tanto os dados medidos com PIV quanto com LDV correspondiam a um número de amostras em cada ponto de medição do escoamento considerado suficiente para calcular as estatísticas. Isto foi verificado através da comparação entre perfis extraídos de dados adquiridos com as duas técnicas e também com dados da literatura.

Define-se as componentes de velocidade em um ponto do escoamento como:

$$U(t) = \bar{U} + u(t), \quad V(t) = \bar{V} + v(t), \quad W(t) = \bar{W} + w(t) \quad (7-5)$$

onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  são as flutuações de velocidade nas direções axial, radial e tangencial, respectivamente.

As equações (7-6), (7-7) e (7-8) definem as grandezas calculadas a partir de amostras em  $N$  instantes de tempo: componentes médias de velocidade ( $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ ), componentes de velocidade turbulenta r.m.s. ( $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ ) e tensão cisalhante turbulenta ( $\overline{uv}$ ), respectivamente.

$$\bar{U} = \sum_{i=1}^N \frac{U_i}{N}, \quad \bar{V} = \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{N}, \quad \bar{W} = \sum_{i=1}^N \frac{W_i}{N} \quad (7-6)$$

$$\begin{aligned}
 u' &= \sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}, \\
 v' &= \sqrt{v'^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2}, \\
 w' &= \sqrt{w'^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2}
 \end{aligned} \tag{7-7}$$

$$\overline{uv} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})(V_i - \bar{V}) \tag{7-8}$$

O único componente do tensor de Reynolds que foi calculado neste trabalho foi  $\overline{uv}$ , para os casos de jato não-espiralado. A tensão  $\overline{vw}$ , por exemplo, não podia ser medida, pois com o equipamento de LDV disponível, não era possível medir simultaneamente as componentes radial e tangencial de velocidade em um dado ponto.

A seguir serão relatados e explicados os procedimentos específicos de tratamento dos dados obtidos com as técnicas de medição de velocidade utilizadas.

### 7.2.1. PIV

O número de amostras era bem menor no caso de utilização da técnica PIV. A frequência de aquisição de pares de imagens com o equipamento utilizado, ou seja, a frequência de medições de campos de velocidade instantâneos é de 15 Hz e, além disso, a capacidade computacional para aquisição e armazenamento das imagens é limitada. Assim, optou-se por fazer 450 aquisições de cada vez, cinco vezes para cada posição da câmera. Isto gerava uma quantidade enorme de dados, 2250 campos instantâneos de velocidade em cada posição. Além disso, para cada configuração do problema, eram adquiridas imagens em pelo menos três posições, movimentando a câmera digital através da mesa de coordenadas.

As imagens eram então processadas, no software *Insight* da TSI. Foi

utilizado para o cálculo de correlação o algoritmo denominado “*Hart Correlator*”, que “comprime” as informações relativas à janela de interrogação, utilizando apenas uma percentagem dos pixels contidos naquela janela (os que tem maior intensidade, que definem uma certa configuração de partículas a ser “procurada” na região de busca). Isto faz com que o processamento, que para um número tão grande de imagens seria muito pesado, seja feito de forma mais rápida. Quando a qualidade das imagens é boa, a utilização deste tipo de processamento não afeta a qualidade dos resultados, ao contrário, para imagens com uma densidade elevada de partículas, ele permite que as janelas de interrogação utilizadas sejam menores, proporcionando assim uma alta resolução espacial. No caso do presente experimento, as imagens (como a da figura 6.1) foram processadas com janelas de 16 x 16 pixels, gerando um campo instantâneo com aproximadamente 15000 vetores.

As imagens processadas sem nenhum tipo de interpolação possuíam pouquíssimos vetores espúrios ou pontos não calculados. Ainda assim, preparou-se uma macro de validação de vetores, através de ferramentas contidas no próprio software. Primeiramente, aplicou-se um filtro denominado “*range filter*”, que eliminava vetores correspondentes a velocidades acima de um certo valor (escolhia-se um valor alto, fora dos limites encontrados no escoamento). Isto servia para eliminar vetores de magnitude muito alta podem surgir como resultado de uma correlação incorreta. Depois aplicava-se um filtro baseado na média dos vizinhos. Nesta etapa é preciso ter bastante cuidado, especialmente se o escoamento estudado apresenta fortes gradientes de velocidade, pois, dependendo da tolerância que se escolhe para o desvio em relação aos valores vizinhos, vetores corretos correm o risco de serem removidos. Outro fator importante neste caso é a escolha do número de pontos que são considerados “vizinhos”. Em casos de buraco no campo de velocidade causados pela eliminação de algum vetor, o ponto tinha a velocidade estimada pela média das velocidades nos pontos vizinhos.

Após todos os campos instantâneos terem sido processados, iniciava-se a etapa de pós-processamento dos dados, que tinha por objetivo calcular as grandezas desejadas. As definições destas grandezas de interesse se encontram nas equações 7-6, 7-7 e 7-8. Para a obtenção de um campo médio de velocidade, por exemplo, as componentes de velocidade de um determinado ponto

correspondentes a todos os campos instantâneos eram somadas e divididas pelo número total de campos (2250 para cada posição da câmera).

Já o desvio padrão de cada componente de velocidade da amostra, correspondente à velocidade r.m.s. axial ou radial, era obtido a partir da subtração de cada campo instantâneo pelo campo médio. Cada um destes novos campos tinha suas componentes em cada ponto elevadas ao quadrado. Fazia-se então uma média destes campos modificados e finalmente extraía-se a raiz quadrada. Todas estas operações podem ser aplicadas a cada ponto dos campos vetoriais de uma só vez. Com isso, obtinha-se o campo de velocidades turbulentas r.m.s., representativo da intensidade de turbulência no escoamento.

Os campos de tensão cisalhante turbulenta,  $\overline{uv}$  eram calculados de forma análoga.

### 7.2.2. LDV

Quando esta técnica era utilizada, obtinha-se um grande número de amostras no tempo para cada ponto medido no escoamento. A partir destes dados, o mesmo software utilizado para a aquisição dos dados fornecia o cálculo das estatísticas inerentes às medições. Assim eram obtidas as grandezas definidas nas equações 7-6, 7-7 e 7-8. O software utilizado na aquisição e processamento dos dados foi o *FIND*, da TSI.