

2

Revisão Bibliográfica

Como já mencionado, a literatura relativa às características de escoamento e transferência de calor de jatos incidentes em placas planas é extensa. Este fato pode ser evidenciado por uma análise nos artigos de revisão disponíveis, como os de Martin [15] e de Downs e James [7]. Os trabalhos citados nestas revisões incluem discussões sobre a influência dos diversos parâmetros que controlam as taxas de troca de calor ou massa, tais como número de Reynolds, tipo de jato, distância jato-placa, distância radial, propriedades termofísicas e intensidade de turbulência no jato. Dentre estes trabalhos destaque especial deve ser dado para o trabalho pioneiro de Gardon e Akfirat [10], de 1965, onde pequenos medidores de fluxo de calor local foram desenvolvidos e utilizados para, pela primeira vez, apresentar a variação do número de Nusselt local com a coordenada radial. Neste trabalho foram revelados picos na troca de calor da placa que foram relacionados com a intensidade de turbulência do escoamento junto à parede.

O estudo de jatos incidentes continua a despertar interesse, como pode ser verificado pela publicação regular de artigos sobre o tema. Novas técnicas computacionais e experimentais vêm permitindo analisar detalhes do escoamento e da transferência de calor nestas configurações. Como exemplo destes trabalhos mais recentes podemos citar o trabalho de Lyttle e Webb [14] focalizado nos efeitos sobre a troca térmica de jatos com pequenas distâncias jato-placa, além dos trabalhos de Azevedo et al [3], Fairweather e Hargrave [9] e Geers et al. [11]. O trabalho de Cooper et al. [5,6] apresenta uma excelente avaliação do desempenho de um conjunto de modelos de turbulência no que diz respeito à previsão de jatos incidentes.

Para o caso de jatos incidentes dotados de componente circunferencial de velocidade – os jatos espiralados – a primeira referência na literatura é encontrada no trabalho de Martin, de 1977 [15]. Neste seu extenso trabalho de revisão o autor menciona, sem no entanto apresentar dados numéricos, que a presença do componente circunferencial de velocidade em um jato incidente não produz

alterações significativas na troca de calor ou massa. Ward e Mahmood [19], no entanto, apresentam conclusões diferentes das de Martin, indicando que a presença do escoamento espiralado reduz significativamente a troca de calor ou massa. É apresentada também uma correlação para o número de Nusselt médio em função da distância jato-placa, do número de Prandtl, do número de Reynolds e da intensidade do escoamento espiralado dada pelo número de *Swirl*. A exatidão desta correlação deve ser verificada, visto ter sido construída com dados de apenas dois valores do número de Reynolds.

Motivado pela contradição dos resultados disponíveis na literatura, no início dos anos noventa foi iniciado no Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio um estudo sobre jatos incidentes espiralados. O trabalho utilizou a técnica de sublimação de naftaleno para determinar a distribuição local dos coeficientes de troca de massa ao longo da placa. Foi investigada uma faixa de número de Reynolds de 9000 a 45000, distâncias adimensionais jato-placa (H/d) de 2 a 8 e três níveis de intensidade de escoamento espiralado dadas pelo número de *Swirl*, 0,28, 0,54 e 0,74, além do caso base com número de *Swirl* igual a zero. Estes estudos foram apresentados em três publicações [1,2 e 8]. As conclusões dos trabalhos indicam que, de uma maneira geral, a presença de um componente circunferencial no escoamento produz uma diminuição nos coeficientes de troca de massa médios quando comparados ao caso base sem escoamento espiralado. Em particular os autores verificaram uma significativa diminuição do valor dos coeficientes de troca de massa na região de estagnação do jato. Este decréscimo foi creditado a uma diminuição na velocidade axial do jato com o aumento da intensidade do escoamento espiralado.

Um dos resultados mais interessantes destes trabalhos foi a identificação da formação de zonas de recirculação na região de estagnação, com a presença de escoamento reverso na linha de centro do jato. Estas observações foram realizadas utilizando técnicas simples de visualização de óleo com pigmentos de negro-de-fumo. Nesta técnica a superfície da placa é inicialmente coberta pela mistura de óleo com o pigmento. Quando o escoamento de ar atinge a placa a tensão cisalhante desenvolvida arrasta o óleo nas regiões de tensões mais elevadas, deixando à mostra o fundo branco da placa. Desta forma, uma imagem da interação do escoamento com a superfície é obtida.

As figuras apresentadas a seguir foram extraídas do trabalho de Almeida e

Azevedo [1]. A Figura 2.1 mostra duas vistas da visualização do escoamento na região de estagnação, em dois níveis de ampliação, para o caso de escoamento espiralado. Na figura 2.1(a), nota-se a região escura no centro da placa formada pelo acúmulo de óleo com pigmento, cercada por uma região clara e depois por outra região mais escura. A observação da ampliação desta imagem na Figura 2.1(b), indica os rastros do escoamento espiralado conduzindo fluido para a região central. Uma visão ainda mais clara deste movimento de fluido para a região central pode ser observada na Figura 2.2. Nesta figura pequenas gotas de óleo com pigmento foram depositadas em quatro posições ao longo de três círculos centrados na linha de centro do jato. Na Figura 2.2(a), que representa o caso sem escoamento espiralado, nota-se que o escoamento junto à placa arrasta as gotas ao longo da direção radial afastando-as do centro do jato. O sentido de deslocamento pode ser notado identificando-se na figura a parte mais grossa de cada traço marcado pelo óleo como sendo o ponto inicial de posicionamento da gota. Já para o caso com escoamento espiralado mostrado na Figura 2.2(b), observa-se que para posições radiais menores que um dado valor o escoamento espiralado conduz o óleo para o centro da placa. Além desta posição radial limite, o escoamento é espiralado (ainda que com menor intensidade) mas movendo-se no sentido oposto. A partir destas observações do efeito do escoamento espiralado sobre a superfície sólida, os autores sugeriram a existência de um sistema de vórtices toroidais, como o representado esquematicamente na Figura 2.3.

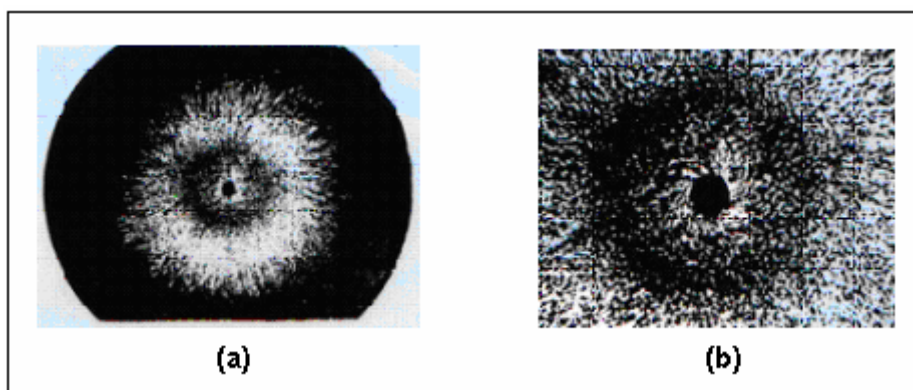


Figura 2.1 - Visualização da superfície atingida pelo jato espiralado [1]

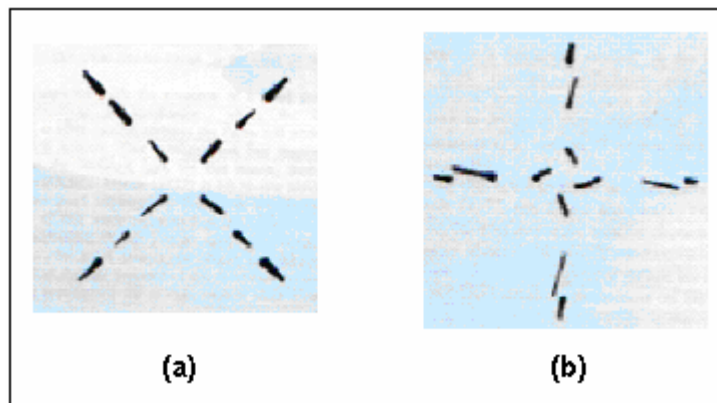


Figura 2.2 – Visualização da região de estagnação do jato espiralado [1]

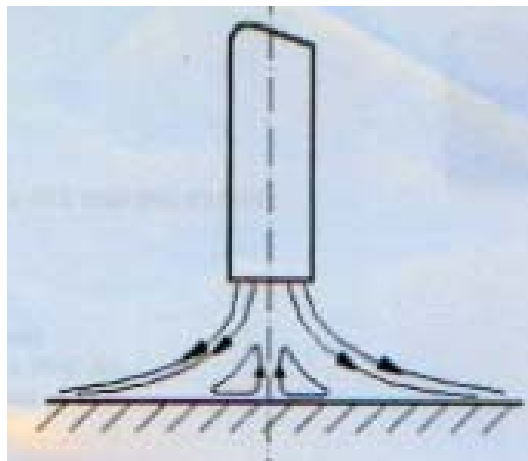


Figura 2.3 - Padrão de escoamento esperado para a região de estagnação do jato espiralado [1]

Em 1997 Huang e El-Genk [12] conduziram um trabalho experimental comparando o desempenho de jatos incidentes espiralados e não espiralados. Os experimentos envolveram medidas de transferência de calor local, assim como visualização. Os autores reportaram aumentos no coeficiente de troca de calor que foram atribuídos aos maiores níveis de intensidade de turbulência obtidos e à redistribuição das velocidade axiais. Os resultados deste trabalho não devem ser generalizados, pois o jato espiralado foi obtido por um dispositivo que bloqueava quase que totalmente a seção transversal do tubo, deixando apenas passagens laterais espirais por onde o fluido escoava junto à parede do tubo. Trata-se portanto de uma geometria bastante particular.

Recentemente Nozaki et al. (2003) [16] combinaram as técnicas de medição de campo global de velocidade (PIV - *Particle Image Velocimetry*) e

temperatura (LIF - *Laser-Induced Fluorescence*) para a medição simultânea de campos de velocidade e temperatura, mas em um Número de Reynolds relativamente baixo ($Re=4000$). O trabalho confirma a existência de uma região de recirculação na região de estagnação indicando que o comportamento dinâmico das zonas de recirculação é o fator determinante na troca de calor turbulenta na região de estagnação.

A revisão bibliográfica apresentada mostrou que ainda são poucos os trabalhos realizados sobre a influência da presença de uma componente circunferencial em jatos incidentes. Esta foi a motivação do presente trabalho que realizou uma investigação detalhada das características do escoamento turbulento e de seu impacto na transferência de calor para um jato espiralado incidente em uma placa plana. Para isto, utilizou-se técnicas de medição instantânea do campo global de velocidade – PIV, em conjunto com medidas instantâneas locais obtidas por anemometria *laser-Doppler* e com medidas locais do coeficiente de troca de calor. Acredita-se que a medição usando-se a mesma seção de testes para a determinação das características de transferência de calor e do escoamento auxilie no entendimento dos fenômenos envolvidos. Como poderá ser observado na apresentação dos resultados, uma quantidade significativa de dados detalhados das grandezas médias e instantâneas do escoamento foi gerada, o que possibilitará, no futuro, a sua utilização para a avaliação do desempenho de modelos de turbulência.

Nos capítulos que se seguem é apresentada uma descrição detalhada do aparato e procedimento experimentais utilizados na realização do trabalho, bem como uma análise dos resultados obtidos.