

1 Introdução

Escoamentos turbulentos podem ser encontrados em uma grande diversidade de aplicações, tanto industriais, como na engenharia, quanto na vida cotidiana. Conseqüentemente é muito importante compreender os mecanismos físicos que governam este tipo de fenômeno.

Escoamentos turbulentos normalmente são classificados em dois grupos: escoamentos livres e escoamento de parede. Jatos incidentes a uma placa pertencem a uma classe particular de escoamento turbulento, a qual é formada pela combinação dos dois tipos de escoamento. Jatos incidentes são excelentes mecanismos de transferência de calor e massa, portanto são amplamente utilizados em aplicações de engenharia. Dentre as áreas mais comuns de aplicação de jatos incidentes pode-se citar resfriamento de placas de aço quentes, produção de vidro temperado, secagem de papéis e películas, refrigeração das lâminas de turbina, assim como refrigeração de componentes eletrônicos, entre outros.

Resfriamento dos micro-componentes eletrônicos é uma das aplicações onde o uso do jato incidente tem se tornado extremamente atraente. Com a diminuição do tamanho dos componentes eletrônicos, a dissipação de calor destes dispositivos se tornou um dos grandes problemas a ser vencido nas indústrias de microeletrônica, pois um sistema de refrigeração de tais dispositivos precisa ser utilizado. Muitos estudos foram realizados, sendo que atualmente o jato incidente tem sido identificado como o método que fornece as mais elevadas taxas de transferência de calor, de forma a fornecer a maior e melhor dissipação do calor nos dispositivos.

A característica comum do jato incidente é o aumento de transferência de calor na região de estagnação e uma diminuição rápida da transferência de calor na parede devido à camada limite formada ao longo da mesma.

A Figura 1.1 apresenta uma representação de um jato incidindo sobre uma superfície plana. Logo após a seção de saída do tubo observa-se uma região de jato livre, a qual possui um núcleo potencial, isto é, uma região ainda não afetada

pela interação do jato com o fluido estagnado do meio externo. Ainda na região de jato livre, observa-se na interface entre o jato e o meio estagnado, o desenvolvimento de uma camada de cisalhamento. Na região onde o jato incide na parede predomina uma região de estagnação no escoamento. Em seguida à região de estagnação o escoamento é forçado a uma violenta mudança de direção, alinhando-se com a superfície plana e formando um escoamento com características típicas de um jato de parede.

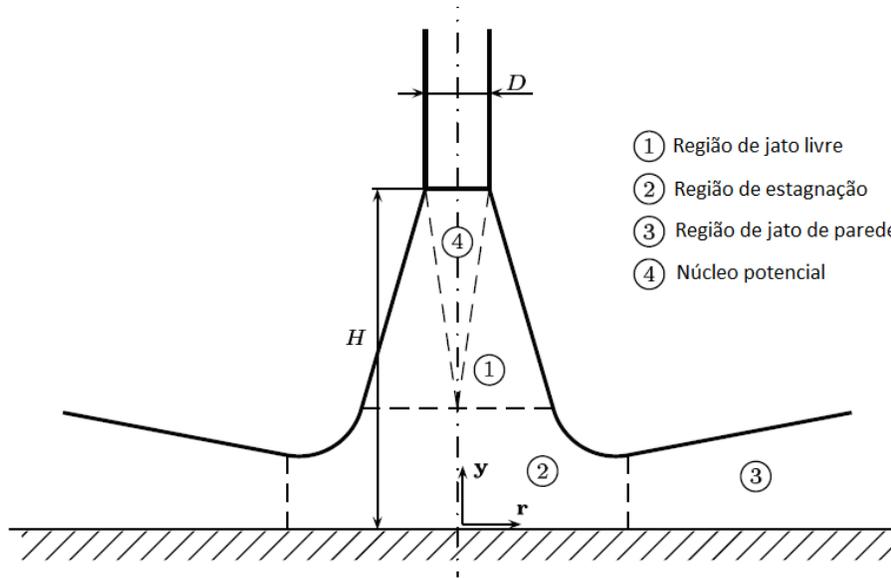


Figura 1.1: Representação esquemática de um jato incidindo sobre uma superfície plana.

Na região do jato livre, a tensão média de cisalhamento é zero e a produção de energia cinética é exclusivamente devido ao esforço normal. À medida que o escoamento se aproxima da parede, a velocidade da linha central diminui até zero no ponto de estagnação. Além disso, a proximidade da parede faz com que a deflexão do jato seja forte e assim uma região de curvatura das linhas de corrente do escoamento é observada. A jusante do ponto de estagnação, um jato de parede evolui ao longo da parede, com escoamento típico de camada limite.

Um dos parâmetros importantes que afetam a transferência de calor do jato incidente com a superfície plana é a condição do escoamento na saída do bocal. A introdução de uma rotação do jato na saída do bocal altera as taxas de cisalhamento, as características do arrasto e da turbulência do escoamento antes de seu choque com a superfície, induzindo uma transferência de calor mais efetiva

entre o jato e a parede. O escoamento espiralado pode ser gerado por espirais dentro do duto de alimentação do jato. O escoamento espiralado é o resultado do efeito combinado de um movimento espiralado (isto é, componente tangencial) com o escoamento axial principal.

A transferência de calor entre a parede de incidência e o fluido ambiental depende de um grande número parâmetros. Por exemplo, a distância do jato à parede é crucial para o desenvolvimento do escoamento e tem uma influência forte na transferência de calor com a parede.

Este tipo de escoamento é rico do ponto de vista dos fenômenos envolvidos, especialmente para o caso do estudo do regime turbulento. Devido à complexidade do escoamento e de regimes presentes, a previsão numérica de um jato incidente sobre superfícies é um desafio a ser vencido, e por esta razão tem sido utilizado como teste para avaliar o desempenho tanto de modelos de turbulência quanto de modelos computacionais na previsão deste tipo de escoamento.

Dentre as regiões características do escoamento de um jato incidente, a região de estagnação é aquela na qual se concentra a maior parte da atividade térmica. Sendo uma região de dimensões reduzidas, a medição direta das propriedades do escoamento em seu interior não constitui uma tarefa simples. Conseqüentemente, a simulação numérica representa uma alternativa atraente para a determinação das propriedades do escoamento de um jato incidente, prevendo as características de perfil médio e de flutuações da velocidade e temperatura, assim como da transferência de calor.

Há poucos anos atrás Abrantes (2005) desenvolveu no Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, um detalhado trabalho experimental de um jato incidente à uma superfície, visando compreender os fenômenos físicos envolvidos, e criando um banco de dados com uma grande quantidade de resultados.

Este trabalho foi realizado utilizando técnicas de velocimetria por imagem de partícula (PIV) e velocimetria por laser Doppler (LDV) para visualizar e medir o escoamento. O escoamento é governado pelo número de Reynolds Re , pelo número de *Swirl* S e pela razão da distância do jato à parede H e o diâmetro do jato.

Distintas configurações geométricas relacionadas com a razão jato-placa

H/D e diferentes números de *Swirl* foram examinadas, para as quais foram disponibilizados perfis de velocidade média, energia cinética turbulenta e de estatísticas de turbulência, contornos de velocidade e flutuações turbulentas assim como também de regiões de recolamento (vórtices).

O experimento foi realizado para altos números de Reynolds (Re) e intensas atividades turbulentas, com estruturas de escoamento altamente anisotrópicas representando assim um grande desafio para qualquer tentativa de modelagem.

A compreensão dos fenômenos turbulentos pode ser obtida a partir de medidas experimentais tais como realizadas por Abrantes (2005), ou através de previsões numéricas. Muitos avanços na área computacional foram desenvolvidos nos últimos anos, o que tem permitido obter previsões confiáveis, as quais podem complementar informações obtidas experimentalmente.

Os escoamentos turbulentos são instáveis e contém flutuações que são dependentes do tempo e da posição no espaço. Entre as características mais importantes dos escoamentos turbulentos, destaca-se a multiplicidade de escalas que os caracterizam. As maiores estruturas (baixas frequências) são controladas pela geometria que as geram, e as menores estruturas (altas frequências) são controladas pela viscosidade do fluido.

O surgimento desta multiplicidade de estruturas é devido à não linearidade das equações que governam o escoamento. Estas estruturas preenchem continuamente o espectro de energia, resultando na necessidade de um enorme número de graus de liberdade, tanto maior quanto maior for o número de Reynolds.

Deste modo se vê necessário o mapeamento destas escalas em um sistema discreto, tal qual uma simulação computacional.

O desafio de se obter uma metodologia computacional capaz de prever com uma boa exatidão fenômenos turbulentos presentes no escoamento de um jato incidente reside no fato da turbulência ser um processo caótico, com uma vasta gama de escalas e estruturas que se estendem de grandes turbilhões até micro vórtices.

Existem diversas metodologias de simulação com diferentes graus de complexidade e precisão. Dentre estas metodologias se encontra a simulação numérica direta (DNS, *Direct Numerical Simulation*), a qual leva em consideração

todas as escalas, e conseqüentemente requer altíssimo espaço de memória, além de passo de tempo extremamente pequeno, consumindo deste modo uma quantidade excessiva de horas de simulação, mesmo para números de Reynolds não tão altos. Logo, não é muito utilizada em aplicações práticas. Por outro lado, esta formulação, por ser muito precisa, tem sido de extrema valia para auxiliar na compressão de fenômenos físicos, para complementar dados experimentais e auxiliar no desenvolvimento e aprimoramento de modelos de turbulência.

As metodologias baseadas nas médias de Reynolds (RANS, *Reynolds Average Navier-Stokes*) situam-se no extremo oposto da DNS dentre as metodologias de simulação de escoamento turbulento (Pope, 2000). O esforço computacional é reduzido fazendo uso de uma média chamada “média de Reynolds. Esta média suprime as flutuações turbulentas, deixando para ser calculado simplesmente o escoamento médio. A parte suprimida das flutuações turbulentas é modelada, visando captar da melhor forma possível as estruturas turbulentas. Como este tipo de metodologia envolve alto grau de aproximação, pode resultar em cálculos pouco precisos, necessitando com frequência de ajustes com dados experimentais. Apesar desta característica semi-empírica, devido a sua simplicidade e rapidez na obtenção da solução, estes métodos têm sido os escolhidos para a maioria de aplicações industriais.

Entre uma simulação DNS mais precisa (demorada e cara e muitas vezes impraticável) e uma simulação menos custosa RANS (prática, porém pouco imprecisa) se encontra a Simulação de Grandes Escalas (LES, *Large Eddy Simulation*) (Sagaut, 2002). Esta metodologia é uma boa opção para se obter resultados precisos com custo mais baixo, pois consiste em filtrar uma quantidade de graus de liberdade. Somente as grandes estruturas (dependentes da geometria) são resolvidas diretamente e as pequenas estruturas filtradas são modeladas.

A técnica LES consiste basicamente na aplicação de filtros espaciais às equações de Navier-Stokes, de forma a separar as pequenas das grandes escalas, (Sagaut 2002). A equação resultante descreve, então, a evolução temporal e espacial das grandes escalas, ficando a influência das pequenas escalas reduzida a um único termo, a ser modelado. Assim como a simulação DNS, esta metodologia é transiente e tri-dimensional. Por resolver diretamente as grandes estruturas, apresenta grande precisão, e disponibiliza resultados detalhados do escoamento, possibilitando melhor entendimento físico e visualização dos fenômenos

envolvidos. Como não resolve todas as escalas, o requerimento de espaço de memória é bem menor do que na metodologia DNS, logo o custo desta simulação é bem inferior.

Para melhor compreender porque a simulação de grandes escalas se mostra como uma metodologia muito atraente é conveniente analisar o espectro de energia. A Figura 1.2 ilustra o espectro de energia $E(k)$ em função do comprimento de onda k . Pode-se observar que nas regiões de baixas frequências, maiores comprimentos de onda, existem os turbilhões de maior energia cinética turbulenta (grandes turbilhões), nesta região têm-se uma injeção de energia, onde a produção é maior. A seguir, encontra-se a zona inercial do espectro, onde os turbilhões de grandes escalas transferem energia para os turbilhões de pequenas escalas, isso acontece continuamente até que ocorra dissipação da energia pelos pequenos turbilhões, que são predominantemente viscosos.

Na Figura 1.2, se mostra o esquema do espectro de energia que auxilia na compreensão da hipótese do equilíbrio de Kolmogorov de 1941 (Pope, 2000), que em sua base diz: os termos viscosos limitam o tamanho dos menores vórtices, a dissipação ocasionada por estes termos deve ser igual à quantidade de energia fornecida. De acordo com a hipótese de equilíbrio, a lei de Kolmogorov define a diminuição da energia cinética com o comprimento de onda como $E(k) = C_k \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$ onde C_k é a constante de Kolmogorov ($C_k = 1,6$; Sreenivasan, 1995), κ_1 a energia cinética inicial, e ε é a taxa de dissipação de energia.

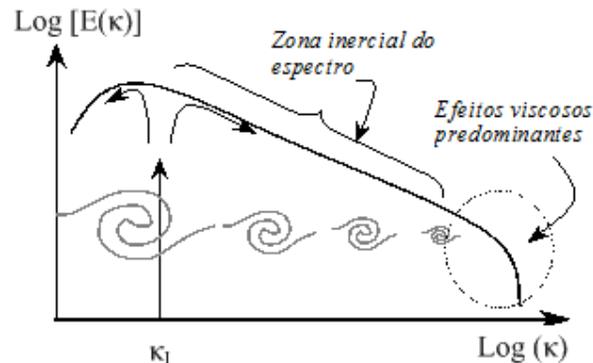


Figura 1.2: Hipótese esquemática de equilíbrio de Kolmogorov (Pope, 2000).

Como, em geral, os filtros utilizados estão intimamente relacionados com os espaçamentos de malha locais, as escalas correspondentes a esse termo filtrado denominam-se escalas sub-malha (SGS, *Sub Grid Scale*), sendo várias as opções

para sua modelagem.

Apesar de continuar havendo certo empiricismo na modelagem sub-malha (SGSM, *Sub Grid Scale Modeling*), o que torna a modelagem LES menos heurística do que a RANS, é o fato intuitivo e comprovado de que tais estruturas são mais gerais, mais homogêneas, menos dependentes da geometria do escoamento, e, sobretudo, menos críticas para a evolução do mesmo. As equações filtradas, incluindo os termos modelados, são então discretizadas com o auxílio de uma malha que deve se adaptar à geometria em estudo. Uma opção muito utilizada, combina o efeito de filtragem com o da discretização num único processo. Daí a tradicional denominação de escalas sub-malha (SGS) para o termo modelado. Cada uma das etapas da LES descritas acima (filtragem, modelagem SGS, e discretização) representa por si só um desafio à parte, sendo todas elas críticas para o sucesso da simulação (Piomelli 1999).

Apesar de existirem diversos trabalhos na literatura disponíveis para estudar o problema de jato axi-simétrico incidente a uma superfície plana, como será apresentado no próximo capítulo de Revisão Bibliográfica, devido à importância na indústria deste tipo de escoamento e da dificuldade de previsão e medição do mesmo, ainda existem diversas lacunas na análise deste tipo de escoamento, as quais a presente tese visa reduzir.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo compreender mediante ferramentas computacionais a física do escoamento turbulento e da transferência de calor da configuração formada por um jato de ar circular axial, com e sem rotação (*Swirl*) incidindo sobre uma superfície plana aquecida, assim como escolher o melhor modelo na caracterização do fenômeno do jato incidente.

Os parâmetros considerados relevantes no estudo do jato incidente foram os seguintes:

- Distância adimensional (H/D), onde H é a distância entre o bocal de saída do jato e a placa aquecida e D é o diâmetro do jato.
- Número de Reynolds Re , baseado na velocidade média do jato V_j , $Re = V_j D/\nu$, onde ν é a viscosidade cinemática.

- Número de *swirl* S , medida da intensidade de rotação do escoamento na saída do bocal do jato. O número de *swirl*, é obtido pela razão entre o fluxo de quantidade de movimento angular M_θ normalizado pelo produto do raio do bocal R e o fluxo de quantidade de movimento axial M_x , $S = M_\theta / (R M_x)$.
- Perfil de velocidade a saída do bocal: utilizou-se o perfil de velocidade experimental medido por Abrantes (2005), e diversas variantes de perfis de velocidade, que vão desde perfil turbulento baseado em lei de potência $1/n$, até perfil com perturbações sobrepostas.

As simulações foram realizadas utilizando tanto a metodologia RANS como LES. A capacidade dos modelos de turbulência em prever este tipo de escoamento foi avaliada comparando os resultados das simulações com os dados experimentais (Abrantes, 2005) e com diferentes resultados de simulações RANS (Jaramillo et. al, 2008 e Kubacki,2010) e simulações LES (Hallqvist, 2006, e Hadziabdic, 2008), da literatura.

Simulações RANS fornecem uma maior rapidez computacional, sendo a escolhida em variadas aplicações industriais. No entanto, a modelagem LES é uma ferramenta que conduz à melhores resultados na caracterização da física de escoamentos complexos, mesmo tendo um custo computacional mais elevado. Deste modo, se procura o ótimo equilíbrio na utilização das metodologias (RANS e LES) para prever a turbulência, e dos métodos numéricos associados a eles no estudo deste tipo de fenômeno.

Para avaliar a metodologia RANS, os seguintes modelos de turbulência foram considerados: $\kappa-\omega$ SST (Menter, 1994, 2003), $\kappa-\epsilon$ padrão (Launder and Spalding, 1972), $k-\epsilon$ Realizável (Shih et al, 1995), $\kappa-\epsilon$ RNG (Yakhot and Orszag, 1991), e RSM (Launder, Reece, and Rodi, 1975; Gibson and Launder, 1978; Launder, 1989).

Na modelagem LES foi utilizado o modelo sub-malha de Smagorinsky Dinâmico (Germano et al., 1991; Lilly, 1992).

A geração da geometria e da malha foi obtida com o software comercial GAMBIT, e a análise numérica foi desenvolvida utilizando o pacote comercial FLUENT (12.1).

1.2 Organização do Trabalho

O presente trabalho é composto de seis capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma Revisão da Bibliografia sobre a física do jato incidente, e das metodologias RANS e LES.

No Capítulo 3 apresenta-se as equações que governam o escoamento de um fluido incompressível no fenômeno do jato axi-simétrico incidente a uma placa. A seguir são apresentados os modelos LES e RANS utilizados neste trabalho.

A descrição do método numérico utilizado e a discretização das equações de transporte é apresentado no Capítulo 4,

No Capítulo 5 são apresentados os resultados para o jato incidente obtidos pela simulação LES, assim como também para as simulações RANS. Estes resultados são comparados com os dados experimentais obtidos por Abrantes (2005) e com outros resultados disponíveis na literatura.

As conclusões finais do trabalho assim como também as dificuldades obtidas e as recomendações para trabalhos futuros são detalhadas no Capítulo 6.