

## 2 Revisão Bibliográfica

Diversos trabalhos experimentais e computacionais relativos às características do escoamento turbulento e da transferência de calor em jatos incidentes sobre superfície plana vêm sendo desenvolvidos, tratando de entender e prever o fenômeno físico. A revisão bibliográfica apresenta trabalhos relacionados às características de jato, geometrias utilizadas, formação de bolhas de recirculação, desenvolvimento da camada limite, variação do número de Nusselt na superfície, etc. Estes estudos foram obtidos tanto experimentalmente como também com as diversas metodologias de simulação numérica.

A revisão bibliográfica é subdividida de forma a apresentar os trabalhos publicados relacionados com a física do problema e os trabalhos relacionados com a modelagem da turbulência.

### 2.1. Física do Problema

A física do problema do jato incidente envolve complexos fenômenos, os quais são descritos separadamente neste capítulo, com a finalidade de explicar as características individuais de cada fenômeno.

Apesar do fenômeno do jato incidente constituir uma geometria simples, a característica física do escoamento é extremamente complexa, pois ele envolve quatro regiões com diferentes tipos de comportamentos: (1) região de jato livre, (2) região de estagnação, (3) região de jato de parede, e (4) região do núcleo potencial. Estas quatro regiões são visualizadas na Fig. 1.1, apresentada no Capítulo 1.

O campo de velocidade instantânea de um jato incidente não é estruturado, pelo contrário é altamente instável e apresenta vários fenômenos de elevada importância, como por exemplo, instabilidade, interações não lineares de vórtices, transição e separação. Isto explica a quantidade significativa de trabalhos, desenvolvidos no mundo todo, dedicada a esta área de investigação. O processo

computacional e código numérico para jatos incidentes também são complexos, uma vez que é preciso prever o comportamento do escoamento em múltiplas direções, requerendo um maior nível de precisão e eficiência que o necessário para o estudo de jatos livres (Danaila e Boersma 2000) e camadas limite.

As características do escoamento e transferência de calor na parede de jatos incidentes convencionais dependem fortemente de uma série de aspectos. O aspecto fundamental é a geometria do problema, assim como a geometria do bocal do jato e o tipo de condição de saída do jato, a superfície de incidência (prato) e a distância adimensional entre o bocal do jato e o prato ( $H/D$ ). Para jatos incidentes as características do escoamento e particularmente a transferência de calor na parede mudam notavelmente para os casos de  $H/D$  pequenos, aproximadamente iguais a 0,5 (Behnia et al. 1999). Além disso, como apresentado no trabalho de Ashforth-Frost et al. (1997), os resultados para jatos incidentes mostram que existe um menor nível de turbulência no jato axial a medida que o núcleo potencial se desenvolve, devido à pouca interação com o meio externo.

É comum relacionar a distância adimensional  $H/D$  com a análise da transferência de calor na parede, através do número de Nusselt,  $Nu$ . Experiências mostram dois níveis máximos do número de Nusselt na parede, localizados dentro da região do núcleo potencial, para o caso do jato axialmente incidente. Isto nem sempre é o caso, pois as condições na saída do jato afetam o caráter da transferência de calor parede. Além disso, como mostrado por Cornado et al. (1999) para relações  $H/D$  inferiores a 2, são formadas estruturas vorticiais dentro da camada cisalhante do jato, o que produz variações das leituras do número de Nusselt na parede. À medida que o jato atinge a região da parede ocorre o desprendimento de vórtices, os quais persistem dentro da região de jato de parede.

Outro parâmetro relevante a ser analisado neste tipo de escoamento é a distribuição da pressão na superfície do prato. Um dos trabalhos na avaliação da distribuição da pressão foi realizada por Tu e Wood (1996), os quais investigaram o escoamento de um jato incidente com  $Re=11,000$ , variando a razão  $H/D$  de 1 até 12. Eles concluíram que a distribuição de pressão na parede não varia muito com a razão  $H/D$ , apresentando sempre uma forma semelhante a uma distribuição Gaussiana.

Assim como a distribuição da pressão a tensão cisalhante na superfície do prato deve ser avaliada, o que pode ser realizado através do coeficiente de atrito,

$C_f$ . No seu trabalho, Yapici et al. (1999) demonstram que tanto a magnitude como a posição radial onde ocorre o máximo valor do coeficiente de atrito mudam consideravelmente com  $H/D$ . Eles encontraram o máximo valor para  $C_f$  em uma geometria  $H/D=4$  e  $Re=9,200$ , na coordenada  $r/D \approx 1$ . À medida que  $H/D$  aumenta, a localização deste valor máximo se desloca para jusante do ponto de estagnação na superfície do prato.

Um dos estudos experimentais de jatos incidente mais citados na literatura disponível foi o trabalho realizado por Cooper et al. (1993). Eles fizeram medições de fio-quente de um jato circular incidente totalmente desenvolvido, para diversas distâncias do bocal ao prato de incidência, variando de  $2 \leq H/D \leq 10$ , e número de Reynolds no intervalo de  $23,000 \leq Re \leq 70,000$ . Seus resultados têm sido muito utilizados para a avaliação de modelos de turbulência, entre os quais se encontram Craft et al. (1993), Dianat et al. (1996) e Park e Sung (2001).

Como foi descrito anteriormente o campo de velocidade de um jato incidente compreende quatro regiões distintas, uma região do jato livre, uma região de deformação (ou região estagnação), uma região de jato de parede, e uma região de núcleo potencial.

Devido à diferença de velocidade entre o núcleo potencial do jato e do fluido ambiente uma camada de cisalhamento é gerada. Comumente esta camada de cisalhamento é a que dá origem à turbulência no jato, porém, quando a distância entre o bocal e a parede é curta, não há comprimento suficiente para a mistura acontecer com o fluido circundante, resultando em um campo de velocidade nas proximidades do ponto de estagnação com uma baixa intensidade turbulenta.

Na região do jato livre, a produção de energia cinética turbulenta é exclusivamente devido ao esforço normal. Na região de estagnação a velocidade é zero e a pressão é máxima; a jusante desta região se desenvolve uma região de curvatura dando origem à formação do jato de parede. Nesta região a energia cinética turbulenta aumenta devido à tensão média de cisalhamento predominante.

Na região de curvatura do jato, duas regiões de produção de turbulência podem ser identificadas, uma externa e outra interna à camada cisalhante. Devido à difusão na direção normal à parede, o gradiente da energia cinética turbulenta,  $\kappa$  destas camadas se homogeneíza, dando origem à formação de um jato turbulento de parede. Na região externa (região totalmente turbulenta) a produção de energia

cinética é elevada, a medida que o jato atinge a região próxima à parede a produção da energia cinética é equilibrada pela dissipação viscosa. Porém na região da sub-camada viscosa, a produção tende a zero e a dissipação viscosa é equilibrada com a difusão viscosa.

O estudo do fenômeno do jato incidente, é realizado dividindo as características principais que o descrevem, sendo elas as seguintes: Jato livre, estabilidade e estruturas do jato livre, jato de parede, estruturas dinâmicas do jato de parede, transferência de calor e massa do jato incidente, e o jato incidente espiralado.

### **2.1.1 Jato Livre**

A região inicial do jato incidente (região (1) da Fig. 1.1) é caracterizada pelo comportamento de jato livre. O jato livre pode ser definido como um jato entrando em um grande recipiente contendo um fluido estagnado. Devido ao espalhamento radial do jato, a velocidade axial diminui continuamente. A região do jato na qual o escoamento não é afetado pela camada cisalhante é chamada de região do núcleo potencial. O escoamento nesta região é essencialmente irrotacional. A camada cisalhante aumenta de tamanho na direção principal do jato, devido ao surgimento de perturbações que trazem consigo grandes vórtices. Inicialmente, se o nível de perturbação é muito pequeno, a instabilidade da camada cisalhante é similar à instabilidade de Kelvin-Helmholtz, descrita pela teoria de estabilidade linear. As perturbações crescem exponencialmente na direção do escoamento, porque os efeitos não-lineares tornam-se rapidamente importantes, induzindo um aumento na escala de comprimento dos vórtices, juntamente com um aumento na gama de escalas, devido às interações não-lineares.

Um fenômeno comum que ocorre na região do jato é chamado emparelhamento de vórtices, o qual depende fortemente da natureza do campo inicial do escoamento (Liu e Sullivan 1996, Hwang et al. 2001; Hwang e Cho, 2003). O chamado emparelhamento de vórtices caracteriza a coalescência de dois vórtices, sendo o vórtice maior conhecido como vórtice primário (PV).

Em aproximadamente quatro diâmetros à jusante do bocal, o jato livre está totalmente desenvolvido e, assim, o núcleo potencial não está mais presente (a distância do bocal até a região onde o escoamento é totalmente desenvolvido varia

de um caso para outro, dependendo das condições na saída do bocal). Além disso, a variação da velocidade média na linha central é independente do número de Reynolds e diminui proporcionalmente ao inverso da distância ao bocal,  $x^{-1}$ , para  $x/D$  maiores que 4-6 (Crow e Champagne, 1971; Hussein et al. 1994; Pope 2000), tornando o jato livre já desenvolvido auto-similar. A velocidade radial, a qual é muito menor do que a axial, também se torna auto-similar, podendo-se obter o valor de sua magnitude a partir da equação de continuidade. No jato turbulento totalmente desenvolvido, os tensores de Reynolds também se tornam auto-similares (Pope, 2000).

Na região chamada de auto-preservação do jato, o escoamento não é influenciado pelas condições de saída no bocal. A distância do bocal na qual o jato atinge este estado não está clara, tal como se mostra em diversas pesquisas, as quais relatam que esta distância pode variar desde  $8D$  até  $70D$ . Fondse et al. (1983) realizaram um estudo sobre a influência das condições do bocal na dinâmica do jato e na região de auto-preservação, e concluíram que para distâncias maiores de  $20 D$ , existe um estado de jato assintótico independente das condições do bocal.

A característica de camada cisalhante, do jato circular se assemelha às características das camadas limites (onde para um escoamento axial se tem gradientes pequenos de velocidade, com fortes gradientes radiais de velocidade e uma homogeneidade na direção tangencial). Logo, as equações da camada limite podem ser utilizadas, sendo demonstrado que a medida que aumenta a distância axial, a quantidade de movimento  $\cong U^2$  é conservada, a energia cinética turbulenta  $\cong U^3$  diminui, e o fluxo de massa  $\cong U$  aumenta. O aumento do fluxo de massa é devido à interação com o meio ambiente externo, e a diminuição da energia cinética turbulenta é consequência da dissipação.

Diversas estruturas podem ser identificadas no jato livre. Estas estruturas são formadas dentro da camada cisalhante anular. Uns dos trabalhos pioneiros sobre as estruturas em jatos foi conduzido por Crow & Champagne (1971). Eles estudaram o comportamento de jatos axi-simétricos sujeitos a modos periódicos (helicoidais e axi-simétricos). Em 1997, Danaïla et al., detectou a mudança de um modo helicoidal para um modo axi-simétrico, dentro da mesma faixa de números de Reynolds utilizados por Crow e Champagne (1971).

Como demonstrado por Crow & Champagne (1971) e Ginevsky et. al., (2004) o caráter dinâmico do campo de escoamento é fortemente afetada pelos distintos modos aplicados. Este atributo pode ser utilizado para alcançar as características de um jato desejado, podendo promover ou suprimir a formação de estruturas vorticiais e de turbulência. Deste modo, as características de mistura e a geração de ruído em jatos livres podem ser controladas. Além disso, é uma ferramenta eficiente para alcançar altas taxas de transferência de calor da parede para jatos incidentes.

Como demonstrado por Raman et al. (1989) a excitabilidade do jato depende, entre outras coisas, do nível de turbulência inicial do jato. Em seus trabalhos experimentais mostraram que o campo do escoamento foi influenciado por uma frequência de perturbação pequena de até 5% do nível da turbulência inicial.

Esses tipos de instabilidades estruturas não formam parte do objetivo desta, e portanto não são discutidas.

### **2.1.2 Jato de Parede**

A região de jato de parede apresenta uma camada cisalhante perto da parede, típica de camada limite, na qual são aplicáveis às leis logarítmicas, caso o escoamento for totalmente desenvolvido. No entanto, ao contrário da camada limite a velocidade ambiental não é constante para grandes distâncias normais à parede. Em vez disso, há um máximo de velocidade a certa distância da parede, acima do qual a velocidade vai para zero. Assim, a característica de jatos de parede apresenta duas camadas de cisalhamento paralelas, entre as quais a exterior se assemelha a uma camada cisalhante livre.

Como demonstrado por Chun e Schwarz (1967) e posteriormente por Cohen et al. (1992), o jato de parede é caracterizado pela coexistência de dois modos instáveis. O modo não viscoso o qual governa as perturbações de grande escala, e o modo viscoso que governa as perturbações de pequena escala. O modo viscoso é dominante na região perto da parede, enquanto o modo não viscoso é dominante na região do jato afastada da parede, sendo este último o mais instável. O estágio de desenvolvimento do jato na região de parede é fortemente influenciado pelas condições iniciais. No trabalho realizado por Knowles e Myszko (1998), o jato de

parede foi produzido por um jato incidente ( $Re=90,000$ ), e as condições iniciais podiam ser modificadas alterando o espaçamento entre o bocal e o prato, de forma a controlar a espessura inicial e o nível de turbulência do jato de parede. Independentemente das condições iniciais, a velocidade média do jato de parede atingiu a auto-similaridade para distâncias radiais maiores a  $r/D = 2,5$  enquanto que as estatísticas turbulentas se tornaram auto-similares mais a jusante, a partir de  $r/D = 4,5$ .

No trabalho de Dejoan e Leschziner (2005) a evolução randômica perturbada de um jato de parede para  $Re=9,600$  foi tratado pela Simulação de Grandes Escalas (LES), dando como resultado um comportamento auto-similar para uma distância igual a  $20D$ .

### 2.1.3 Jatos Incidentes

Jatos incidentes representam um tema de interesse em diversas aplicações industriais e de engenharia. De fato, os jatos incidentes possuem varias aplicações relacionadas às indústrias aeronáuticas, metalurgia, química e eletrônica. Um jato incidente é um escoamento tridimensional e complexo. Alguns exemplos típicos das aplicações de jatos incidentes incluem a sustentação de veículos, a limpeza e o tratamento de superfícies, a promoção de reações químicas e o resfriamento, em geral, de máquinas, equipamentos e circuitos elétricos/eletrônicos.

O jato incidente consiste em um escoamento tridimensional bastante complexo. A configuração inicial do escoamento apresenta características típicas de jato livre, entretanto, ao incidir sobre uma superfície, o jato é defletido radialmente, gerando a configuração de jato de parede a alguma distância à jusante da região de incidência. A Figura 2.1 de Lee e Lee (2000) mostra uma visualização do escoamento típico de um jato incidente.

Dentre as quatro regiões características do escoamento de um jato incidente, a região de estagnação é aquela na qual se concentra a maior parte da atividade térmica. Por ser uma região de dimensões reduzidas, a medição direta das propriedades do escoamento em seu interior não constitui uma tarefa simples, conseqüentemente a simulação numérica é uma alternativa atraente para a determinação das propriedades do escoamento de um jato incidente, sendo que o

principal ponto de interesse está relacionado à obtenção dos coeficientes de atrito e troca térmica na parede.

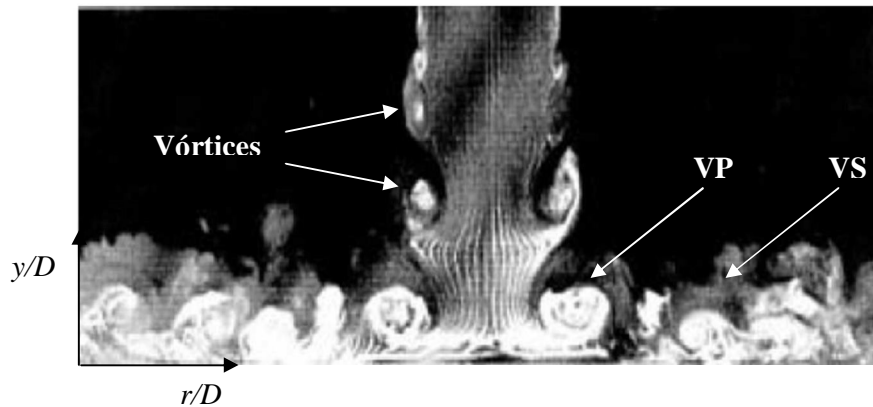


Figura 2.1 – Visualização do escoamento de um jato incidente (Lee e Lee, 2000).

Conforme ilustrado na Figura 2.1, em um jato incidente, as estruturas coerentes de vórtices originadas no bocal são defletidas ao atingirem a superfície, originando uma região de grande curvatura das linhas de corrente logo após a região de incidência. Na maior parte de sua espessura, o jato de parede resultante é dominado pelas estruturas de grandes escalas. Assim sendo, as contribuições de origem viscosa e turbulenta às propriedades do escoamento estão confinadas a uma região muito pequena, adjacente à parede.

A simulação numérica de jatos incidentes envolve, portanto, a descrição de um escoamento turbulento complexo, essencialmente anisotrópico, resultante da interação entre o jato e a superfície. Tais características impõem a utilização de modelos de turbulência aptos a descrever as propriedades turbulentas tanto na região do escoamento livre quanto na região próxima à parede.

O problema do jato incidente sobre placa plana tem sido objeto de diversos estudos. Craft et al. (1993) desenvolveram um extenso trabalho a respeito a aplicação de modelos de turbulência para a predição das propriedades do escoamento de jatos incidentes. Eles avaliaram o desempenho de quatro modelos de turbulência, incluindo o modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  e três modelos baseados no transporte das tensões de Reynolds. Craft et al. adotaram como referência para seu trabalho os dados experimentais obtidos por Cooper et al. (1993) para os perfis de velocidade média e as tensões de Reynolds. Os resultados obtidos indicaram valores excessivamente altos para o coeficiente de transferência de calor. Do mesmo



modo nenhum dos modelos previu com sucesso o efeito do número de Reynolds no escoamento. Eles chegaram à conclusão de que a qualidade dos resultados depende em grande medida de uma adequada descrição das propriedades do escoamento na sub-camada viscosa.

Dianat et al. (1996), na tentativa de obter uma melhor descrição da influência da parede nas flutuações do campo de pressões, adotaram uma formulação modificada do modelo de transporte das tensões de Reynolds. Os resultados obtidos indicaram que as modificações introduzidas permitiram uma melhor previsão das flutuações de velocidade normais.

Tanto as características dos fenômenos do jato incidente, assim como os fenômenos produto da transferência de calor na superfície, são responsáveis pela característica do jato, sendo necessária uma abordagem detalhada na descrição de cada uma deles, tal como mostrado a seguir.

#### **2.1.4 Características Dinâmicas do Jato Incidente**

Dependendo da distância de separação entre o bocal de saída do jato e a parede de incidência, as características dinâmicas do jato podem ser afetadas. Vários autores têm observado que os grandes vórtices que incidem na parede podem induzir um fenômeno de retroalimentação, o que desencadeia um fluxo na direção contrária. Esse fenômeno pode resultar em uma mudança no comportamento dinâmico do jato.

O mecanismo de retroalimentação é de grande importância para a dinâmica do jato, pois se as ondas de pressão induzidas apresentam intensidade de ordem similar às instabilidades inerentes hidro-dinâmicas, pode dar origem ao fenômeno de ressonância. O fenômeno de ressonância acústica do mecanismo de retroalimentação ocorre para elevadas velocidades do jato incidente, quando estas são da mesma ordem que a velocidade da onda acústica (Rockwell e Naudascher, 1979). De acordo com Ho e Nossier (1981), a ressonância é obtida para um número de Mach  $M=0,9$ . Porém, outro grupo de autores tal como Umeda et al. (1987), Hourigan et al. (1996) e Ginevsky et al. (2004), chegaram à conclusão que o fenômeno de ressonância surge para  $M = 0,5$ . Para escoamentos de baixa velocidade ( $M \leq 0,1$ ) ondas acústicas são irrelevantes e o escoamento pode ser

considerado incompressível.

Adicionalmente ao fenômeno de retroalimentação acústica pode ocorrer uma retroalimentação hidro-dinâmica através do retorno do jato propriamente dito (Rockwell e Naudascher 1979; Thomas e Chu 1989; Maurel et al. 1996; Hsiao et al. 2004). Conseqüentemente para jatos incidentes a formação das estruturas de vórtices coerentes (na camada cisalhante do jato livre) pode ser influenciada pelo espaçamento entre a saída do jato e a parede de incidência. No entanto, de acordo com o trabalho experimental de Popiel e Trass (1991), a formação inicial de vórtices não é influenciada pela presença da parede de incidência.

Como mostrado no trabalho experimental de Anderson e Longmire (1995), a frequência de ocorrência dos vórtices medida nas proximidades da parede de incidência ( $0,02D$  acima da parede), é ligeiramente superior para jatos incidentes em comparação aos jatos livres. Já na região de jato livre, acima de  $1D$  da parede, nenhum efeito relacionado ao impacto foi observado. Isto sugere que o fenômeno de retroalimentação não é relevante para o desenvolvimento do escoamento na região inicial do jato axial, se  $H/D$  é maior do que 1. As possíveis influências deste mecanismo não foram consideradas neste trabalho, já que o foco principal não era descrever as fontes de formação de vórtices.

Para compreender as características complexas dinâmicas de jatos incidentes, pode-se analisar o campo de vorticidade instantânea apresentado na Fig. 2.1. Neste caso específico são claramente ilustradas as características básicas da dinâmica do escoamento, mostrando a formação axissimétrica de vórtices.

Analisando a Fig. 2.1 pode-se observar dois vórtices toroidais entre aproximadamente  $y/D=1,0$  e  $y/D=1,5$ , sendo  $y$  a coordenada axial. À medida que o tempo progride, os vórtices se unem e formam um vórtice toroidal maior denominado de vórtice primário (VP). Os vórtices primários, formados a partir do emparelhamento, se apresentam numa seção mais a jusante do escoamento. A espessura local do núcleo do jato axial, antes da incidência na parede, está associada à escala dos vórtices toroidais apresentados. Se o espaçamento entre o bocal de saída do jato e a parede de incidência fosse maior, este vórtice se apresentaria mais a jusante. Dentro do jato de parede, em torno de  $r/D=1$ , um vórtice toroidal simétrico é localizado, o qual é denominado de vórtice secundário (VS). Este vórtice pode causar separação de escoamento, induzindo um gradiente

de pressão adverso. Mais a jusante do escoamento, a energia dos vórtices diminui e finalmente estes se quebram e são completamente absorvidos pelo escoamento envolvente.

Há mais de três décadas, a formação de vórtices secundários e a separação já haviam sido observadas por Harvey e Perry (1971). Posteriormente, em 1985, Didden e Ho realizaram estudos detalhados sobre a separação instável produzida por um jato incidente. Eles mostraram que a camada limite é separada periodicamente como consequência dos vórtices primários, os quais induzem gradientes adversos de pressão instável. Observaram que a velocidade de convecção dos vórtices primários foi a mesma, tanto no jato de parede como na camada cisalhante anular do jato axial.

Tsubokura et al. (2003) investigou numericamente, com a simulação numérica direta (DNS) e a simulação de grandes escalas (LES), a influência da condição de entrada do jato no processo de transição de vórtices. Diversos trabalhos experimentais apresentam informações sobre o campo do escoamento do jato incidente na condição de entrada, entre os quais Popiel e Trass (1991), Anderson e Longmire (1995), Cornado et al. (1999), e Angioletti et al. (2003).

Uma exaustiva análise visando controlar as estruturas vorticais formadas no interior de jatos incidentes circulares foi realizada por Liu e Sullivan (1996) para um número de Reynolds de 12,300. As estruturas vorticais foram controladas pela frequência natural, a qual correspondia a um número de Strouhal  $St_D$  baseado no diâmetro, no valor de 1,23. Para  $H/D=1,1$ , eles verificaram que o jato incidente possui a mesma frequência natural que o jato livre. Para  $H/D$  menores, a presença da parede de incidência resultou em um aumento da frequência. A partir da análise realizada pode-se concluir que para  $H/D > 1$ , não há influência do mecanismo de retroalimentação no campo de escoamento inicial.

Tanto Liu e Sullivan (1996) quanto Cornado et al. (1999) mostraram que para pequenos espaçamentos,  $H/D = 1,125$ , nenhum vórtice de grande escala foi formado dentro da camada cisalhante anular e que os vórtices desprendidos do escoamento foram desviados pela parede. Liu e Sullivan, em 1996, concluíram que dependendo da frequência, o caráter dos pares de vórtices muda. Eles obtiveram valores limites de frequência na avaliação de formação de vórtices. Quando o valor da frequência é menor a  $St_D \approx 0,83$  ( $St_D$  é o número de Strouhal avaliado no diâmetro) os pares de vórtices apresentaram um comportamento

estável, e quando o valor da frequência era maior em torno de  $St_D \approx 1,53$  surgia o fenômeno de intermitência de vórtices. No primeiro caso vórtices secundários rotacionais eram formados (induzindo o mecanismo de separação instável), enquanto que no segundo caso menos estruturas organizadas são formadas.

O número de Strouhal,  $St_D = \frac{fD}{U_j}$  é definido como o produto da frequência

de formação de vórtice pelo comprimento característico (diâmetro do jato) sobre a velocidade média do escoamento.

Experiências com velocimetria por imagem de partículas (PIV) foram realizadas por Landreth e Adrian (1990), que estudaram o campo do escoamento instantâneo do jato incidente circular para  $Re = 6,564$  e  $H/D = 4$ . Eles observaram um aumento abrupto na espessura da camada limite na parede, em aproximadamente dois diâmetros a jusante do ponto de estagnação. A partir desses resultados, concluíram que os vórtices secundários constantemente se rompem na região do jato de parede.

Hall e Ewing (2005) estudaram a influência do número de Reynolds ( $Re = 23,300$  e  $Re=50,000$ ) na formação tridimensional de estruturas vorticais presentes em um jato circular incidente totalmente desenvolvido, com espaçamento entre o bocal de saída do jato e a parede de incidência igual a 2. Eles mostraram que a contribuição normalizada dos modos azimutais foi aproximadamente igual para os dois casos de números de Reynolds considerados. No entanto, a partir dos espectros de frequência foi observado que as estruturas de grandes escalas eram mais proeminentes e de caráter mais periódicos para o caso de números de Reynolds elevados.

### **2.1.5 Transferência de Calor em Jatos Incidentes**

Jatos incidentes em superfícies sólidas são amplamente conhecidos por sua capacidade de fornecer altas taxas de transferência de calor na parede (ou equivalentemente em transferência de massa). Por esta razão, jatos incidentes são amplamente utilizados em aplicações industriais que envolvem refrigeração ou aquecimento. A transferência de calor no alvo de incidência (quantificado pelo número de Nusselt,  $Nu$ ) é influenciada por três mecanismos: convecção do

escoamento médio, transporte turbulento e difusão molecular. Na região da parede, os efeitos difusivos dominam. Alguns dos aspectos básicos da transferência de calor em jatos podem ser encontrados no trabalho de Arganbright e Resch (1971).

Como descrito anteriormente o parâmetro geométrico  $H/D$  é de grande importância na avaliação do Nusselt na parede. Se o espaçamento é maior do que o comprimento do núcleo potencial, o jato turbulento totalmente desenvolvido irá incidir na parede. Devido ao alto nível de energia cinética turbulenta  $\kappa$  na região central do jato axial, uma máxima transferência de calor é obtida no ponto de estagnação. A jusante ao ponto de estagnação o número de Nusselt diminui monotonamente. Se o núcleo potencial é maior do que  $H/D$ , a região inicial do jato de parede se torna laminar, com baixos níveis de energia cinética turbulenta e o número de Nusselt passa por um mínimo no ponto de estagnação. À medida que o jato de parede laminar acelera, o esforço cisalhante na parede aumenta, devido à diminuição da camada limite de velocidade. O valor máximo local do coeficiente de atrito  $C_f$  é obtido aproximadamente em  $r/D = 1/2$ . Na região que o jato se comporta como laminar, o valor máximo de atrito na parede é acompanhado pelo valor máximo de transferência de calor parede. A partir deste valor máximo e um pouco a jusante o valor do  $Nu$  decresce. Mais a jusante a gama de escalas cresce, e o jato de parede torna-se turbulento, o que leva a um segundo valor máximo de  $Nu$ . Deve-se ter em conta também que o segundo valor máximo do  $Nu$  também é influenciado por grandes estruturas organizadas, sendo que estas estruturas coerentes também podem dificultar a formação do mesmo (Liu e Sullivan, 1996). Valores máximos de transferência de calor no ponto de estagnação são atingidos quando o espaçamento entre a saída do jato e a parede fica em torno de 6-8 diâmetros (Baughn e Shimizu, 1989). Para pequenas relações  $H/D$ , o nível da energia cinética turbulenta  $\kappa$  é o fator limitante, e para relações  $H/D$  maiores a quantidade de movimento axial é o fator limitante.

A transferência de calor na parede é fortemente influenciada pela dinâmica da instabilidade do campo de velocidade. Geralmente estruturas caóticas têm um efeito positivo sobre a transferência de calor de parede, enquanto as grandes estruturas ordenadas dependendo do sentido de rotação têm um efeito obstrutivo. De acordo com Liu e Sullivan (1996), a transferência de calor na parede possui

contribuições provenientes de: (1) escoamento médio, (2) estruturas coerentes, (3) estruturas caóticas turbulentas e (4) difusão molecular. Eles verificaram que uma grande quantidade de estruturas caóticas era gerada quando ocorria o emparelhamento de dois vórtices intermitentes, induzindo o segundo nível máximo do número de Nusselt em  $r/D = 1,5 - 1,8$ .

Na análise realizada por Hwang et al. (2001) e Hwang e Cho (2003), os pares de vórtices foram obtidos dentro da camada cisalhante livre, contrariamente ao obtido no trabalho de Liu e Sullivan (1996). A presença de pares de vórtices resulta em um menor núcleo potencial, e, portanto um maior  $Nu$  para  $H/D$  pequenos, e um menor  $Nu$  para  $H/D$  maiores.

Viskanta (1993) observou que o número de Nusselt  $Nu$  é proporcional a  $Re^{0,5}$  para  $r/D = 2$ , e proporcional a  $Re^{0,7}$  para os raios maiores. Tawfek (1996) propôs uma correlação para a variação do número de Nusselt ao longo do prato ( $2 \leq r/D \leq 30$ ), em função do número de Reynolds,  $3,400 \leq Re \leq 41,000$ , Prandtl e razão de aspecto  $6 \leq H/D \leq 58$ .

O número de Reynolds do jato incidente apresenta uma forte influência sobre a transferência de calor na parede, especialmente para  $H/D$  pequenos. Como mostrado por Angioletti et al. (2003), a transferência de calor no ponto de estagnação aumenta em 15% quando o número de Reynolds varia de 1,500 para 4,000, em uma geometria  $H/D = 4,5$ , enquanto que para  $H/D = 2$ , este aumento foi de 56%. O segundo valor máximo do  $Nu$  foi obtido no caso de  $Re$  elevados. Tawfek (1996) e Chan et al. (2002) observaram que a transferência de calor no ponto de estagnação aumenta linearmente com o aumento Reynolds, para todos os valores de  $H/D$  considerados.

Chan et al. (2002) observaram que a relação de dependência entre o  $Re$  e o  $Nu$  na região de estagnação aumenta a medida que  $H/D$  se torna maior do que o núcleo potencial. A faixa considerada do número de Reynolds testada por Chan et al. foi  $5600 \leq Re \leq 13,200$ . Foi demonstrado que modificações das condições de superfície (Baukal e Gebhart, 1997; Beitelmal et al., 2000) ou pela instalação de placas perfuradas antes do impacto do jato à superfície (Lee et al., 2002a) podem alterar significativamente a transferência de calor. A forma do bocal na saída do jato também tem grande influência sobre a transferência de calor na parede, especialmente para  $H/D$  pequenos (Colucci e Viskanta, 1996; Garimella e

Nenaydykh, 1996; Brignoni e Garimella, 2000; Lee e Lee, 2000a, b).

Estudos numéricos envolvendo diferentes comparações de modelos RANS aplicados a jatos incidentes planos e circulares com transferência de calor foram desenvolvidos por Jaramillo et al. (2008), sendo que a viscosidade turbulenta foi avaliada com modelos  $\kappa-\varepsilon$  e  $\kappa-\omega$  lineares e não lineares. Eles realizaram comparações com dados experimentais para a velocidade média, flutuações de velocidade e número de Nusselt local. Maiores coeficientes de transferência de calor foram obtidos para o caso de jato axi-simétrico do que no caso de jato plano. A previsão do segundo pico no número de Nusselt foi relacionada com o aumento dos níveis de turbulência perto da parede de incidência, o que permitiu relacionar as tensões de Reynolds e os níveis de turbulência com a transferência de calor.

Recentemente, Kubacki e Dick (2010) utilizaram simulações com um modelo híbrido RANS/LES, obtido a partir do modelo  $k-\omega$  (Wilcox, 2008), para prever a transferência de calor em jatos incidentes. Eles investigaram o escoamento para números de Reynolds variando de 5,000 a 23,000 e razões de aspecto  $H/D = 2$  e  $6$ .

Nas simulações de Kubacki e Dick foi observado que os modelos RANS superestimam a comprimento da região do núcleo potencial, pois sobreestimam a produção de energia cinética em relação à região de estagnação. Os modelos LES visam resolver as escalas responsáveis pela produção de turbulência. Na região da parede, o tamanho dos vórtices é comparável à escala de Kolmogorov, exigindo uma resolução de uma malha extremamente fina, aproximando-se a uma solução de uma DNS.

Com o objetivo de diminuir o problema da resolução da malha em regiões de parede, eles aplicaram o modelo híbrido RANS/LES, onde o modelo RANS atua na região de parede e o modelo LES em regiões afastadas da parede. Os resultados obtidos mostraram que o modelo híbrido RANS/LES fornece uma melhor predição da tensão de cisalhamento e da taxa de transferência de calor ao longo da parede de incidência, em comparação ao modelo  $k-\omega$  padrão (tradicional).

O modelo híbrido também apresentou um desempenho melhor devido a sua capacidade de resolver a evolução na camada cisalhante do jato, a qual afeta fortemente o escoamento turbulento e a transferência de calor convectiva na região de estagnação e na região de desenvolvimento da região de jato de parede.

Kaseoglu e Baskaya (2010) estudaram experimentalmente e numericamente a influência do tipo de geometria na saída do jato, na transferência de calor de um jato incidente. As experiências foram realizadas utilizando cristais líquidos termocrômicos, e as experiências numéricas foram realizadas utilizando uma geometria 3D e o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  para baixos números de Reynolds. Geometrias circulares, elípticas e retangulares com razões de aspecto adimensionais  $H/D$  igual a 2, 6 e 12 foram avaliadas. Eles observaram que a medida que a razão de aspecto aumenta, menores taxas de transferência de calor são obtidas. Embora a vazão mássica tenha sido igual para todos os casos, a taxa de transferência de calor para jatos com seção retangular foi reduzida com o aumento da seção transversal. Observaram também que com o aumento da distância entre o jato e a parede, as características de transferência de calor se tornavam similares.

Muitos estudos abordam o problema do jato incidente com fluidos compressíveis. Recentemente, dois trabalhos foram publicados. No primeiro Limaye et. al., (2010) estudaram experimentalmente a distribuição da transferência de calor local gerada por um jato circular de ar compressível sobre a superfície de incidência. Diversos números de Mach e Reynolds foram utilizados para caracterizar o escoamento. O número de Nusselt local foi baseado na temperatura adiabática. Eles concluíram que as taxas de transferência de calor aumentam a medida que aumenta o número de Mach e o número de Reynolds, para todas as relações de aspecto  $H/D$  e em todas as posições radiais estudadas. Um incremento substancial no número de Nusselt médio foi observado quando o número de Mach variou de 0,2 a 0,4. O segundo trabalho foi realizado por Dauptain et al., (2010), utilizando a simulação de grandes escalas (LES), para investigar o escoamento de um jato supersônico incidente numa placa. A influência de três níveis de refinamento de malha nos campos de velocidade médios e instantâneos, e de pressão na parede, assim como da viscosidade turbulenta foram investigados. Uma boa concordância com as observações experimentais foi obtida.

### **2.1.6 Jatos Incidentes Espiralados**

Um jato espiralado livre apresenta as mesmas características básicas do jato livre não espiralado, no qual a instabilidade de Kelvin-Helmholtz induz à



formação de vórtices. No entanto, instabilidades adicionais são introduzidas pelo componente angular de velocidade. Estas instabilidades podem ser devido à instabilidade centrífuga (Billant et al., 1998). Como demonstrado por Panda e McLaughlin (1994) o crescimento global das ondas instáveis em jatos espiralados é uma consequência do crescimento rápido da espessura dinâmica.

Huang e El-Genk (1998) e Lee et al. (2002) realizaram trabalhos experimentais com jato circular espiralado incidente com a presença de transferência de calor. Em ambos os trabalhos, concluiu-se que o efeito do jato espiralado foi representativo principalmente perto da região de estagnação, obtendo valores de número de Nusselt médios mais baixos para valores de número de *Swirl* crescentes. Para distâncias radiais maiores,  $r/D > 2$  o efeito do *Swirl* foi insignificante. Em ambos os trabalhos, jatos circulares incidentes convencionais, i.e., sem a presença do componente espiral (angular), também foram investigados. Uma variante do jato incidente foi estudada por Wen e Jang (2003), na qual para pequenas distâncias do jato à placa, jatos incidentes múltiplos eram produzidos, de forma análoga ao que ocorre com os geradores de *Swirl*. Os jatos múltiplos apresentam altos níveis de turbulência devido ao cisalhamento adicional, o que contribui para um aumento na transferência de calor na parede. Contrariamente aos resultados de Lee et al. (2002), Wen e Jang (2003), concluíram que a transferência de calor na parede aumenta com o aumento do número de *Swirl*. O efeito máximo foi encontrado para um alto número de Reynolds, no valor de 27,000 e pequenas relações  $H/D$ .

Nozaki et al. (2003) investigaram experimentalmente as características de transferência de calor de um jato espiralado incidente, pela técnica combinada de velocimetria por imagem de partículas (PIV) e fluorescência induzida por laser (LIF), para medição simultânea de velocidade e campos de temperatura. O estudo mostrou que a largura radial do jato aumenta com a intensidade da componente angular, e que o fenômeno de alongamento radial contribui no máximo coeficiente local de transferência de calor. Eles concluíram ainda que o comportamento dinâmico de zonas de recirculação, as quais são atribuídas ao número de *Swirl* e a distância de incidência, determinam a transferência de calor turbulenta na região de estagnação.

Larocque (2004) realizou simulações RANS envolvendo a transferência de calor em jatos espiralados incidentes. Os modelos utilizados foram o  $\kappa-\omega$  SST,

$v^2 - f$  (válidos até a parede), e os modelos  $\kappa-\varepsilon$  RNG e RSM (sendo utilizadas as funções de parede). Comparações com dados experimentais mostraram que todos os modelos apresentaram bom desempenho, sendo que o modelo  $v^2 - f$  apresentou a melhor concordância. Eles observaram que a adição da rotação induziu um deslocamento na posição do número de Nusselt máximo. Efeitos mais pronunciados foram observados na região de recirculação para pequenas razões de aspecto  $H/D$ . Hallqvist (2006) apresentaram um estudo sobre a transferência de calor de um jato incidente convencional e espiralado empregando a simulação de grandes escalas (LES). A distância entre o bocal e o prato foi mantida como  $H/D = 2$ , com número de Reynolds igual a 23,800. Três números de *Swirl* foram considerados ( $S=0, 0,5$  e  $1,0$ ). Eles concluíram que a produção da turbulência aumenta com o aumento da intensidade do número de *Swirl*, promovendo uma melhor transferência de calor na parede. Abrantes (2005) investigou experimentalmente o mesmo fenômeno, adotando dois espaçamentos entre o bocal e o prato,  $H/D = 2$  e  $6$ . O número de Reynolds foi mantido igual a 21,000 e três números *Swirl* 0, 0,3 e 0,5 foram considerados. Os resultados indicaram que os componentes circunferenciais geravam zonas de recirculação no núcleo do escoamento, o que reduz significativamente o número de Nusselt na região de estagnação.

Estudos experimentais mais recentes foram realizados por Alekseenko et al. (2007) e Kim e Giovannini (2007). No primeiro trabalho Alekseenko et al. (2007) apresentam um estudo experimental de um jato incidente com diferentes intensidades do número de *Swirl*, utilizando a técnica de PIV. A principal ênfase do trabalho foi analisar a influência do número de *Swirl* na estrutura do escoamento. O número de Reynolds foi fixado em 8,900, a distância entre o bocal e o prato foi igual a 3 diâmetros, e foi investigada uma faixa de número de *Swirl* entre 0 a 1,0. Eles observaram que a magnitude da difusão da pressão diminuiu com o aumento do número de *Swirl*, e que jatos espiralados incidentes têm uma taxa de propagação e decaimento mais rápido na velocidade absoluta, quando comparados aos jatos não espiralados. No segundo trabalho, Kim e Giovannini (2007) investigaram o escoamento para número de Reynolds igual a 23,000. Suas medições foram realizadas utilizando velocimetria por imagem de partículas (PIV), a visualização do escoamento foi realizada através de um corante

fluorescente e termografia infravermelha. Nas suas experiências observou-se um pico secundário no coeficiente de transferência de calor, e a sua origem foi atribuída à elevada produção de cisalhamento junto com a turbulência externa proveniente do jato livre.

No trabalho realizado por Felli et al. (2009), foi estudado o efeito da distância do bocal ao prato de incidência, e do número de *Swirl* na deformação do jato incidente e na perturbação induzida na parede, utilizando técnicas de PIV e visualização de escoamento. Eles concluíram que o aumento da distância de incidência implica na redução da energia do jato na região de parede devido à dissipação e mecanismos de desestabilização. Por outro lado a redução da distância de incidência proporciona uma maior deformação do jato na parede, realizado por uma transferência de quantidade de movimento, a qual se intensifica a medida que a distância do jato de parede diminui.

Ortega-Casanova e Fernandez-Feria (2009) realizaram um estudo da transição tridimensional de um jato espiralado incidente em uma parede sólida com números de Reynolds baixos, utilizando a simulação numérica direta (DNS). A análise permitiu caracterizar as instabilidades não lineares dos escoamentos axisimétricos 3D, e sua posterior evolução. Eles concluíram que para um determinado número de Reynolds existem várias transições provocadas pelo aumento do número de *Swirl* na condição de entrada e pelo desenvolvimento de instabilidades não-axisimétricas.

Yang et al. (2010) investigaram experimentalmente o problema do jato anular incidente com e sem rotação (*Swirl*). Eles apresentaram resultados referentes à estrutura do escoamento, distribuição de pressão na parede e às características da transferência de calor. Eles concluíram que para pequenas e intermediárias distâncias de separação entre o jato e a placa, o jato anular espiralado produz maiores não uniformidades na distribuição da pressão e na transferência de calor na parede de incidência, comparada com o jato anular convencional. Por outro lado, para maiores distâncias de separação, o jato espiralado apresenta distribuições mais uniformes de pressão e transferência de calor na parede.

## 2.2 Turbulência e seus Respectivos Modelos de Simulação

A turbulência se encontra entre os mais complexos fenômenos encontrados na natureza, sendo tridimensional e transiente. A importância prática da compreensão da turbulência é muito grande e crescente com o tempo, envolvendo diversas pesquisas na física, química, engenharia, biologia, meteorologia e astronomia, entre outros. Desde Leonardo da Vinci em 1510 (Piomelli et al., 2001) os estudos neste domínio têm acontecido, com interpretações relevantes baseadas somente em observações visuais (Fig. 2.2). Ele observou a esteira de vórtices gerada à jusante de um obstáculo a qual é composta por uma extensa quantidade de frequências randômicas e da recirculação do escoamento. Esta foi provavelmente a idéia precursora do processo de decomposição de escalas de Reynolds (1894).



Figura 2.2 – Esquema da visualização de Leonardo da Vinci

Ao longo de cento e vinte anos desde os experimentos de Osborne Reynolds, muitos progressos foram feitos, entre os quais as teorias estatísticas de turbulência apresentaram uma boa descrição das estruturas do escoamento turbulento, particularmente na identificação de estruturas de vórtices coerentes, responsáveis pela maior parte da produção de energia.

Grandes esforços têm sido realizados para o desenvolvimento de ferramentas numéricas que possam ser empregadas tanto para a realização do que hoje pode ser chamado de “experimentação numérica” quanto para a obtenção de informações para ser aplicadas em atividades de engenharia. Dentre as maiores dificuldades para o desenvolvimento da modelagem matemática dos escoamentos

encontra-se a problemática da modelagem da turbulência. A modelagem da turbulência pode ser aplicada a diversas situações práticas, sendo o foco de sua aplicação neste trabalho dirigido a jatos incidentes a placas com transferência de calor.

Apesar de sua importância, e do grande número de pesquisas recentes, sejam trabalhos teóricos, experimentais ou numéricos, a turbulência continua sendo um dos problemas em aberto da Mecânica.

Em 1941 Kolmogorov, propôs sua famosa teoria da auto-similaridade, na qual os grandes vórtices do escoamento são dependentes da geometria do escoamento, enquanto os pequenos são auto-semelhantes e têm um caráter universal. Por esta razão, tornou-se prática comum resolver apenas os grandes vórtices.

Muitos autores (Moin, 2002) vêm desenvolvendo novas capacidades nos modelos de caracterização de escoamentos turbulentos sejam com modelos baseados nas médias de Reynolds (RANS), utilizando a simulação numérica direta (DNS), simulação de grandes escalas (LES), ou ainda utilizando modelos híbridos (LES/RANS) (Spalart, 2000).

Um dos grandes problemas ainda continua sendo a previsão de separação da camada limite e a transferência de quantidade de movimento após a separação neste tipo de fenômenos.

Schmidt et al., (2003) discutiram a inversão do sentido natural da cascata de energias: a transferência líquida de energia, que em escoamentos isotrópicos longe de paredes, normalmente se dá no sentido das grandes para as pequenas escalas, passa então a ocorrer no sentido inverso, ou seja, das pequenas para as grandes escalas.

Deve-se considerar, no entanto no desenvolvimento de um modelo LES de parede, não só a interação entre as várias escalas da região da parede, como também, a interação mútua entre as duas regiões (a região próxima da parede e a restante). A maioria dos modelos propostos na literatura considera que a região externa (onde são realizadas as simulações das grandes escalas propriamente ditas) estabelece, uni-direcionalmente, as características e o comportamento da região da parede. Para a solução das regiões próximas à parede precisam ser utilizadas malhas refinadas, para evitar a utilização das leis de parede.

Outro tópico de grande importância nas simulações LES é a modelagem

sub-malha (SGSM), a qual é responsável pela dissipação da energia contida nas pequenas escalas. Dispõe-se atualmente de diversos modelos, que variam em grau de complexidade e capacidade de representação correta do fenômeno. Os modelos sub-malha vêm sendo muito estudados nos últimos anos. Para uma ótima simulação LES, em termos de resultados devem-se investir esforços em quatro grandes áreas: processo de filtragem e discretização, versatilidade da malha, modelagem sub-malha (SGSM) e modelagem de regiões próximas a paredes.

### 2.3

#### **Adaptação dos Modelos de Turbulência ao Problema do Jato Incidente**

Isman et al., (2008), utilizaram modelos RANS para avaliar numericamente, os dados experimentais de Beitelmal et al., (2000) aplicados a jatos incidentes com transferência de calor. Sua validação foi baseada em cinco modelos de duas equações, baseados em aproximações RANS. Sendo que os de melhor desempenho foram os modelos  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão e o modelo Realizável RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$ , o qual é a normalização do modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$ , podendo identificar escalas menores de turbulências muitas vezes não identificadas pelo modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$ .

Behnia et al., (1999), previram o processo de transferência de calor de um jato turbulento axissimétrico incidente em uma placa plana, empregando o modelo de turbulência de velocidade normal de relaxamento  $v^2 - f$ . Eles apresentaram resultados para o número de Nusselt, magnitude da velocidade normalizada, flutuações de velocidade e coeficientes locais de transferência de calor na parede para  $H/D=2$  e  $H/D=6$ . Todos os resultados apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais de Cooper et al., (1993). O modelo  $v^2 - f$  assume uma viscosidade turbulenta efetiva, mas utiliza componentes diferentes das flutuações de velocidade para calcular o quanto a mistura turbulenta deve ser adicionada à equação original. Embora, nenhuma melhoria é esperada devido às limitações para se capturar as estruturas anisotrópicas, é possível melhorar o amortecimento na região próxima à parede, a qual é influenciada diretamente pelas flutuações anisotrópicas.

Simulações de grandes escalas foram testadas para caracterizar o comportamento do jato incidente. Hadziabdic & Janjalic (2008), realizaram

simulações com LES, na tentativa de reproduzir resultados experimentais de Geers et al., (2004) a um  $Re=2 \times 10^4$ . Os resultados conseguidos apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais tanto nas grandezas de primeira, como de segunda ordem, assim como também na avaliação no número de Nusselt na parede, os quais foram comparados com os resultados de Baughn & Shimizu (1989). Outro caso de simulação de grandes escalas foi realizada por Hallqvist (2006), ele comparou sua simulação com os dados experimentais de Cooper et al., (1993). O número de Reynolds característico de simulação igual ao experimental foi de  $Re=2,3 \times 10^4$ . Os resultados apresentaram boa concordância com os experimentais na avaliação das grandezas médias, e não muito próximos na avaliação das estatísticas turbulentas.

Esta diferença de resultados, obtida entre as duas modelagens LES realizadas por Hadziabdic & Janjalic (2008) e Hallqvist (2006), é devida à distinta condição de entrada imposta na simulação. As condições de entrada LES representam um grande desafio, já que uma grande parte da velocidade deve ser especificada a cada passo de tempo. Impor no escoamento médio perturbações aleatórias, em geral não são bem sucedidas (Frohlich & Rodi, 2002), desde que estas perturbações não são físicas e produzem estatísticas turbulentas erradas, tal como os resultados de segunda ordem obtidos por Hallqvist (2006). A fim de coincidir com a condição de entrada utilizada nos experimentos de referência, a entrada do jato deve ser gerada por uma simulação LES do duto de alimentação do jato, onde o escoamento turbulento é totalmente desenvolvido. O campo de velocidade no plano de saída do tubo deve ser guardado e armazenado em cada passo de tempo. Estes dados deverão ser utilizados para definir os componentes de entrada de velocidade para a simulação do jato incidente. Esta última escolha na condição de entrada foi utilizada por Hadziabdic & Janjalic (2008), os quais obtiveram melhores resultados na avaliação das grandezas de segunda ordem.

Maldonado & Nieckele (2008a) investigaram o fenômeno do jato incidente utilizando o modelo  $\kappa-\omega$  SST. Resultados aceitáveis foram obtidos referentes às grandezas médias. Em outro trabalho, Maldonado & Nieckele (2008b), exploraram o problema empregando a modelagem direta dos tensores de Reynolds, RSM, com a finalidade de captar com maior intensidade as grandezas turbulentas do escoamento. Resultados qualitativamente aceitáveis foram obtidos referentes às grandezas médias assim como também nas estatísticas turbulentas.