

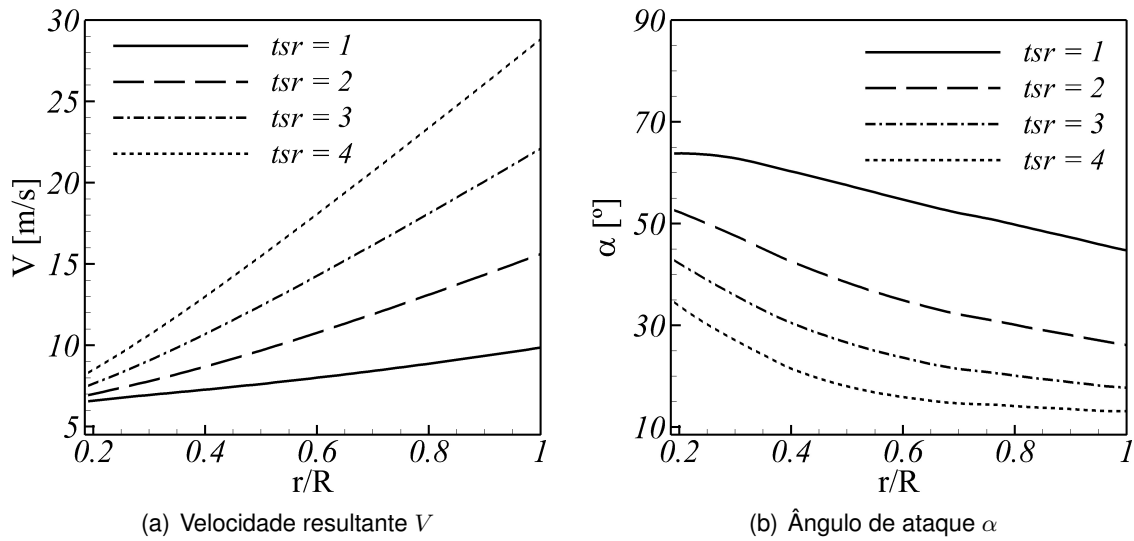


Figura 5.13 – Velocidade resultante e ângulo de ataque em função de r/R para vários valores de tsr .

A Fig. 5.14 mostra os diferenciais de força que atuam em cada elemento de pá na direção normal, dF_n e na direção tangencial dF_t da turbina. Nota-se que para ambas as forças quanto maior a rotação da turbina maior será a força em cada elemento. As forças são diretamente proporcionais à velocidade resultante V , que aumenta com o raio, e inversamente proporcional ao comprimento da corda c , que também aumenta com o raio. Desta forma, para cada tsr o ponto de maior força, tanto na direção normal quanto na direção tangencial, está em uma posição no centro da pá. Na base da pá as forças são relativamente menores por se tratar de pontos com baixa velocidade resultante, e estas forças diminuem na ponta da pá pelo fato da corda possuir menor comprimento.

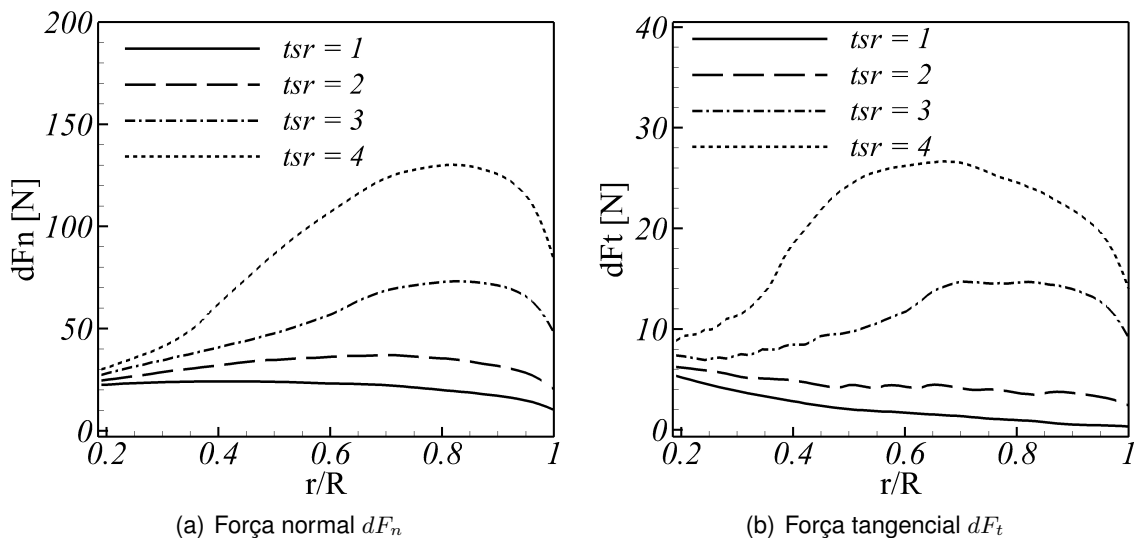


Figura 5.14 – Forças normal e tangencial que atuam na pá para diferentes valores de tsr .

O erro para o cálculo dos fatores de interferência no processo iterativo é calculado da seguinte forma:

$$\varepsilon = \max(|a - a_{ant}|, |a' - a'_{ant}|), \quad (5.1)$$

onde o índice *ant* diz respeito ao fator de interferência calculado na iteração anterior. Foi fixado um erro máximo $\varepsilon = 10^{-6}$. A Fig. 5.15 apresenta o gráfico deste erro em função de r/R para os diferentes valores de *tsr*. Observa-se que para todos os elementos de pá o valor do erro está abaixo do limite máximo, mostrando que ao aplicar o processo iterativo o valor das variáveis *a* e *a'* convergiram para um valor.

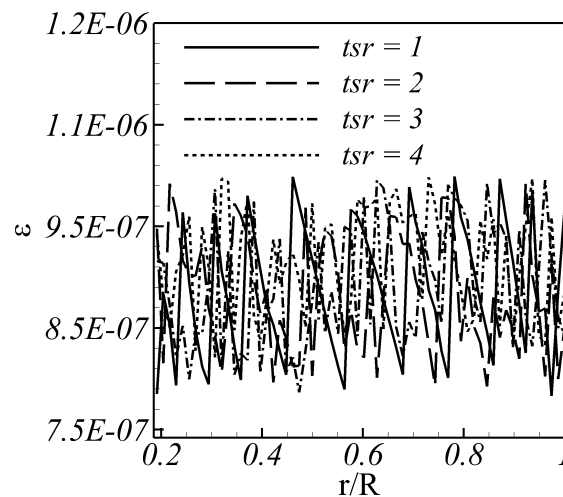


Figura 5.15 – Erro em função de r/R para vários *tsr*.

Com os valores corretos dos fatores de interferência chega-se a valores verdadeiros para as forças que atuam em toda a pá. Como dito na seção de modelagem de turbina de eixo horizontal no Cap. III, ao multiplicar o diferencial de força tangencial pelo raio obtém-se o torque em cada elemento de pá, somando o torque de todos os elementos chega-se ao torque total. Multiplicando este torque pela velocidade angular da turbina chega-se a potência, e dividindo esta potência pela variação da energia cinética total do vento que chega na turbina obtém-se o coeficiente de potência, o qual é mostrado na Fig. 5.16 para todos os casos simulados em função de *tsr*. Esta curva segue a tendência de uma máquina rotativa, iniciando-se com baixa potência para baixas rotações. Conforme a rotação aumenta o coeficiente de potência também aumenta, atingindo um ponto de máxima eficiência. Neste caso o coeficiente chega ao máximo de $C_p = 0,48$ para a razão de velocidade *tsr* = 7. Após este ponto de eficiência máxima a curva decai, podendo tornar negativa para elevadas rotações. A curva do coeficiente de potência em

função da razão de velocidade tsr é importante para se definir a faixa de operação da turbina, onde com esta informação pode-se projetar e controlar a turbina de forma que ela opere na faixa de tsr com maior eficiência.

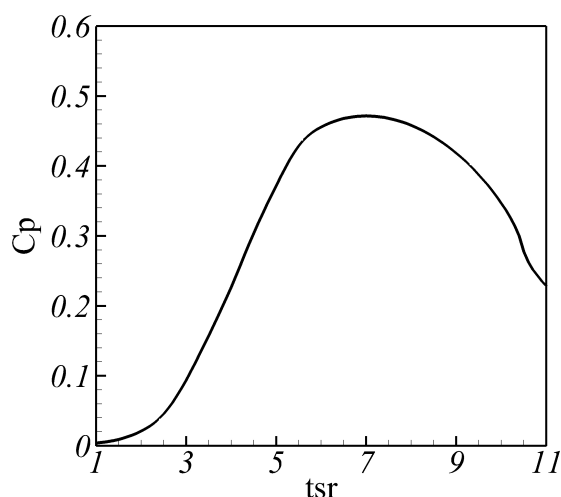


Figura 5.16 – Coeficiente de potência C_p em função de tsr .

Não é objetivo deste trabalho propôr uma configuração de turbina eólica visando uma maior eficiência, contudo a Fig. 5.17 apresenta um exemplo de alteração que pode ser feita no projeto de um rotor eólico em busca de um melhor aproveitamento energético. Esta figura apresenta a curva do coeficiente de potência em função de tsr para turbinas com diferentes números de pá. Foram simuladas turbinas variando de 1 a 6 pás. Nota-se que a turbina de uma pá apresenta a maior faixa de operação, porém possui o pico máximo de potência mais baixo comparado com as outras configurações. A partir da turbina de uma pá até a de três pás o coeficiente máximo de potência aumenta, porém a faixa de operação diminui. A turbina de quatro pás comparada com a turbina de três pás não aumenta de forma significativa a potência, ocorrendo uma redução na faixa de operação. Turbinas com números de pás maiores que quatro reduz cada vez mais o coeficiente de potência e a faixa de operação. Concluindo, nota-se que a configuração mais adequada para esta turbina é a de três pás por possuir uma eficiência máxima próxima da maior possível, e ainda possui uma faixa de operação relativamente grande. Isto pode ser notado na prática, uma vez que a maioria das fazendas eólicas possuem turbinas com 3 pás.

Na seção a seguir será apresentada a validação do código computacional utilizado na formulação diferencial.

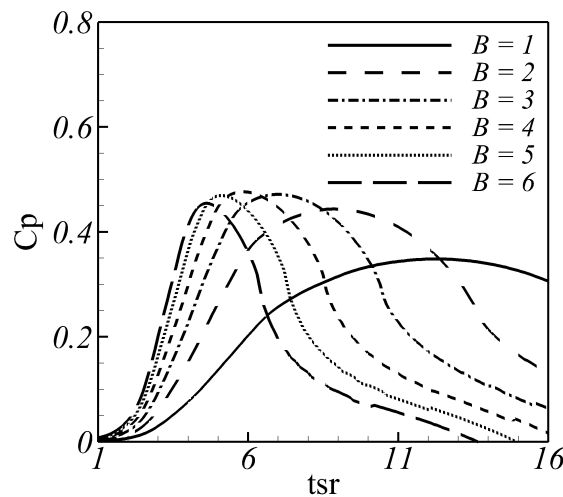


Figura 5.17 – Coeficiente de potência C_p em função de tsr para turbinas com diferentes números de pás.

5.3 Validação do código computacional FLUIDS3D

Nesta seção será apresentada a validação do código FLUIDS3D, onde foram realizadas simulações para o problema da cavidade com tampa deslizante e escoamento livre sobre uma esfera. Vedovoto (2011) também apresenta a verificação e validação desta ferramenta computacional.

5.3.1 Cavidade com tampa deslizante

Para validar as equações da fluido dinâmica e da turbulência implementadas no código computacional utilizado no presente trabalho será simulado o clássico problema da cavidade com tampa deslizante. A Fig. 5.18 apresenta um esquema físico desta cavidade, a qual é tridimensional, possui comprimento, largura e altura iguais a 1 m , e a parede que desliza com velocidade constante $U = 1\text{ m/s}$, na direção positiva de x , se encontra no plano xy em $z = 1\text{ m}$. Todas as demais paredes permanecem paradas, ou seja, com velocidade em qualquer direção nula. Assim, para este problema da cavidade foi imposto no código computacional condição de contorno do tipo Dirichlet em todas as paredes, uma vez que a velocidade foi imposta diretamente em todos os contornos.

A Fig. 5.19 apresenta a malha utilizada, vista no plano xz em $y = 0,5\text{ m}$. Esta malha segue o mesmo padrão para as outras duas direções, e a mesma possui 60 volumes nas três direções, sendo que para cada uma das direções apresenta *stretch* com maior refinamento nas

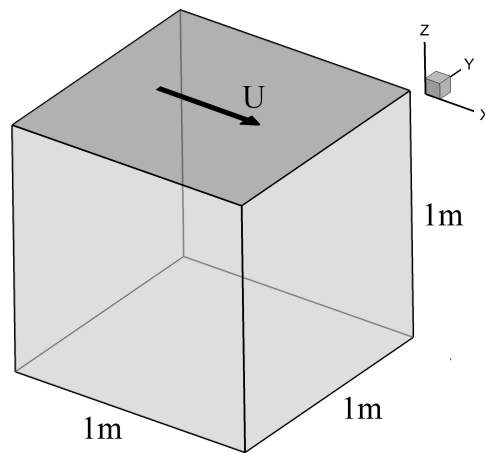


Figura 5.18 – Cavidade tridimensional com tampa deslizante.

paredes. Esta escolha é feita pelo fato de que as maiores tensões ocorrem nas paredes do domínio, então o uso de um maior refinamento nestas regiões implicam em uma maior captura de detalhes do escoamento.

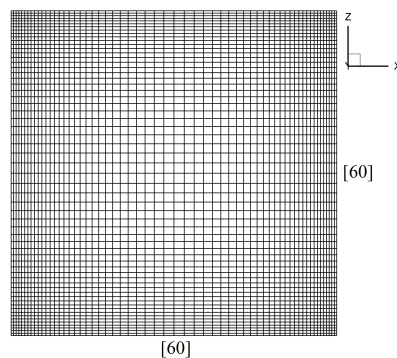


Figura 5.19 – Malha vista pelo plano xz em $y = 0.5\text{ m}$.

O código *FLUIDS3D* possui a opção de processamento paralelo. Usufruindo desta capacidade todo o domínio de cálculo foi subdividido em 8 regiões de igual espaçamento, como mostrado na Fig. 5.20. O processamento paralelo contribui para a distribuição das tarefas de simulação, uma vez que os sistemas de equações a serem resolvidas, gargalo em qualquer solução numérica, são divididos entre os processadores.

Foram simulados escoamento em regime laminar, com Número de Reynolds $Re = 1000$, e em regime turbulento, sendo adotado $Re = 10000$. Em ambos os casos foram simulados 430 s físicos, e a média e RMS foram calculados a partir do tempo $t = 300\text{ s}$. Foi usado critério $CFL = 0,5$ para calcular o passo de tempo. Para validação foram analisados qualitativamente os campos do escoamento, e quantitativamente comparando com a literatura os perfis de velocidade e RMS extraídos dos planos médios.

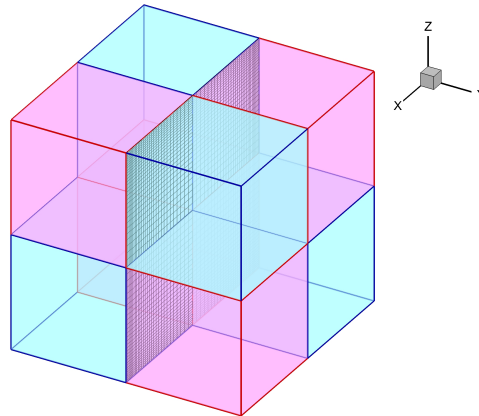


Figura 5.20 – Subdomínios divididos para processamento paralelo.

A Fig. 5.21 apresenta campos de velocidade u e w no plano médio $y = 0,5 m$ com $Re = 1000$. Nota-se que as condições de contorno são respeitadas, onde o valor máximo da velocidade u se encontra na tampa deslizante da cavidade e o menor valor desta velocidade se encontra no fundo da mesma, indicando que o fluido está retornando na direção negativa de x , e em todas as outras paredes esta velocidade em x é nula. Pelo plano de velocidade w observa que o seu valor mínimo se inicia onde a tampa deslizante termina, ou seja, o fluido movido por esta tampa é lançado para baixo quando se choca com a parede à direita, e o valor máximo desta velocidade em z se encontra próximo a parede da esquerda, mostrando que o fluido retorna do fundo para a parte superior da cavidade. Observa-se ainda que as condições de contorno são também respeitadas observando o plano de velocidade w .

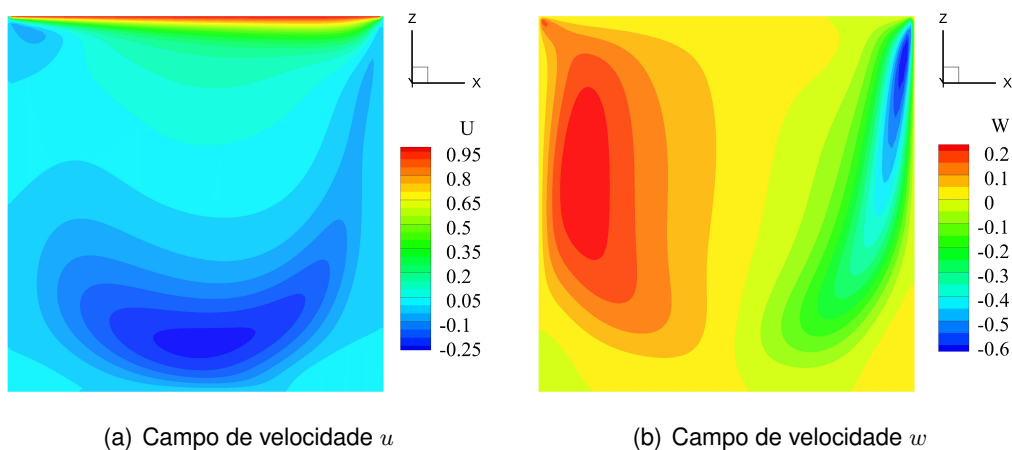


Figura 5.21 – Campo de velocidade no plano médio em $y = 0,5 m$ com $Re = 1000$.

Este choque do fluido com a parede a direita faz com que a pressão aumente neste ponto, como pode ser visto pelo campo de pressão no mesmo plano médio $y = 0,5 m$, mostrado na Fig. 5.22. Além disso a pressão é mínima no interior da cavidade, como esperado. Através destes planos de velocidade e pressão, observa-se que o acoplamento pressão-velocidade

implementado no código computacional é satisfeito qualitativamente.

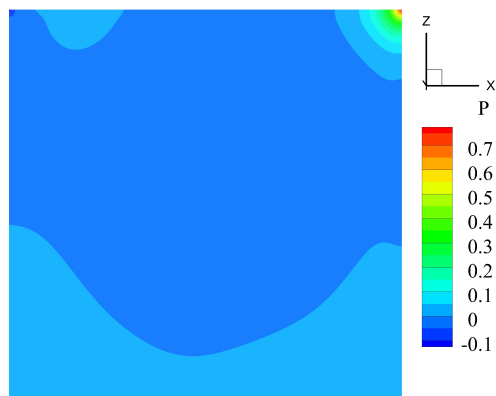


Figura 5.22 – Campo de pressão no plano médio em $y = 0,5\text{ m}$ com $Re = 1000$.

A Fig. 5.23 apresenta uma vista tridimensional da cavidade, onde os planos médios nas três direções são exibidos mostrando o campo do módulo da velocidade. São exibidas algumas linhas de corrente lançadas no plano médio $y = 0.5\text{ m}$. Esta figura expõe com mais clareza a recirculação principal existente no interior da mesma, e mostra ainda duas recirculações secundárias que existem nos cantos inferiores. Pelas linhas de corrente nota-se, pela recirculação principal e secundária maior, que o fluido é lançado para o interior do vórtice e expulso na terceira dimensão, dando uma consistência física qualitativamente satisfatória.

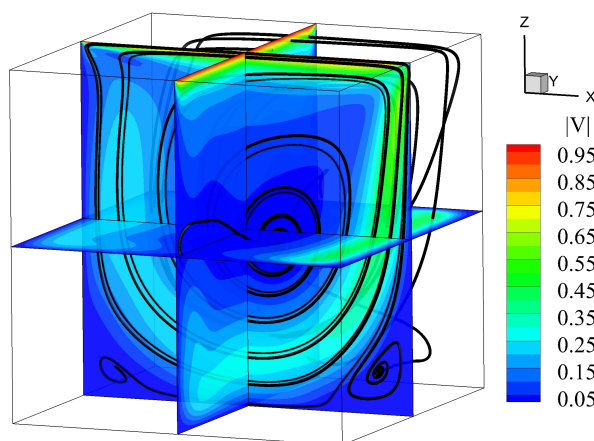


Figura 5.23 – Campo módulo da velocidade $|V|$ nos planos médios e linhas de corrente com $Re = 1000$.

Feita a análise qualitativa, a Fig. 5.24 apresenta uma análise quantitativa. O perfil de velocidade u em função de z no plano $y = 0,5\text{ m}$ em $x = 0,5\text{ m}$, e o perfil de velocidade w em função de x no plano $y = 0,5\text{ m}$ em $z = 0,5\text{ m}$ são comparados com dados da literatura expostos por Deshpande e Milton (1998). Observa-se que o perfil de velocidade u possui valor máximo na posição da tampa deslizante, como esperado, e partindo da tampa para o fundo esse perfil

de velocidade decai, passa por uma posição onde esta velocidade é nula, e se torna negativa próximo ao fundo atingido um pico negativo, e em seguida esta velocidade negativa diminui até atingir velocidade nula na tampa inferior, a qual está parada. Pelo perfil de velocidade em w nota-se também que as condições de contorno são nulas, e apresentam dois picos próximo às paredes, um negativo e um positivo, regiões estas onde o fluido escoar na direção vertical no sentido negativo e positivo nas paredes à direita e à esquerda, respectivamente. Ambos os perfis quando comparados com a literatura são satisfatórios.

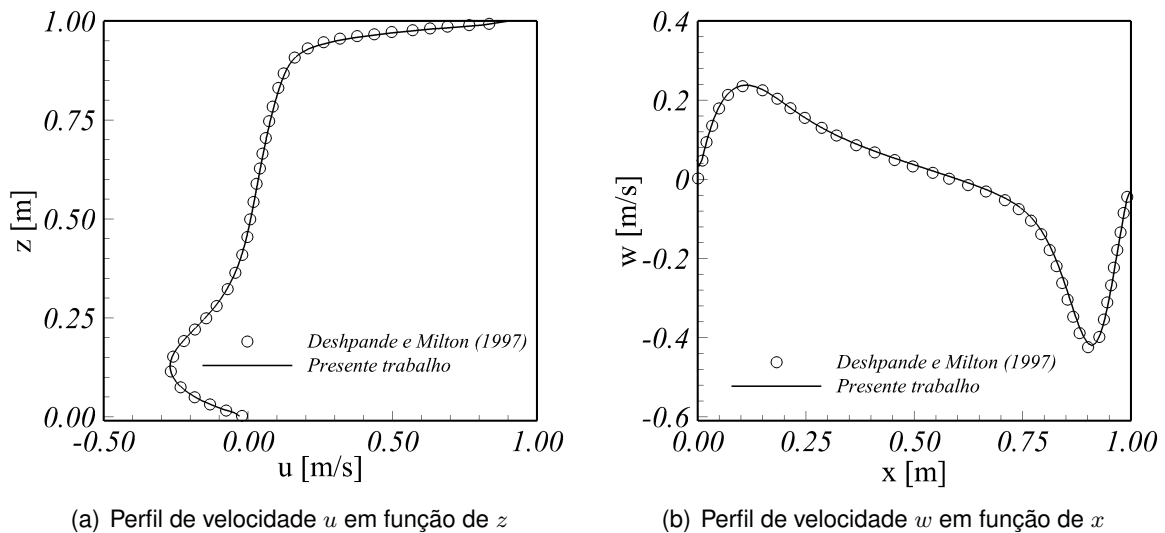


Figura 5.24 – Perfis de velocidade no plano médio $y = 0,5\text{ m}$ comparados com a literatura (DESHPANDE; MILTON, 1998) com $Re = 1000$.

As figuras seguintes apresentam dados simulados em regime turbulento com $Re = 10000$, onde foi utilizado o modelo dinâmico sub-malha. A Fig. 5.25.a mostra algumas linhas de correntes lançadas no plano médio $y = 0,5\text{ m}$ coloridas com o módulo da velocidade $|V|$ no tempo final $t = 430\text{ s}$. A característica do escoamento é similar ao observado na simulação com $Re = 1000$, porém com uma dinâmica mais caótica, ou seja, mais turbulenta. Estas linhas não ficam mais aprisionadas quase em sua totalidade em um plano como no regime laminar, sendo que para este caso o fluido gira no interior da cavidade de uma maneira tridimensional. A Fig. 5.25.b apresenta a iso superfície do critério Q , o qual quantifica a rotação do fluido, e esta superfície é colorida com o módulo da velocidade $|V|$ em $t = 430\text{ s}$. Observa-se uma maior não linearidade nos vórtices secundários que surgem devido à instabilidade que ocorre entre a interação do vórtice secundário com o primário. Uma melhor visualização desta iso-superfície é possível utilizando uma malha mais refinada com um menor stretch.

A Fig. 5.26 apresenta o perfil de velocidade média u em função de z no plano $y = 0,5\text{ m}$