A: XXXIX-0000

EFEITO DA ESBELTEZ FINITA EM ESTRUTURAS DE SEÇÃO CIRCULAR SOB A AÇÃO DO VENTO VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

FREE-END EFFECT ON THE CIRCULAR CROSS-SECTION STRUCTURES ON THE WIND FLOW BY NUMERICAL SIMULATION

Marcela L. Santos (1)(A); Michèle S. Pfeil (2); Alvaro L. G. A. Coutinho (2)

(1) Eng. Civil, D.Sc. Prof. Adjunta, Instituto Multidisciplinar – UFRRJ, Nova Iguaçu-RJ, Brasil.
(2) Eng. Civil, D.Sc., Prof. Titular, Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
Endereço para correspondência: marcelalsantos@ufrrj.br; (A) Apresentador

Área temática: Métodos Computacionais

Resumo
Estruturas esbeltas de seção circular, como torres e chaminés, são bastante suscetíveis ao fenômeno de desprendimento de vórtices. Embora essas estruturas apresentem geometria simples, quando submetidas a ação do vento, exibem comportamento complexo relacionado à separação do escoamento e à física da esteira que, nesse caso, depende fortemente do número de Reynolds. Efeitos tridimensionais são originados pela esbeltez finita das estruturas, variação de diâmetro ao longo da altura e da velocidade média do vento. Nestes moldes, o presente estudo focaliza o desenvolvimento de simulações numéricas de alta fidelidade do escoamento em torno de estruturas rígidas fixas, de diâmetro constante e com variação linear, nas condições de esbeltez infinita e finita, a elevados números de Reynolds. A solução das equações de Navier-Stokes incompressíveis é obtida por Fluido Dinâmica 3D, considerando o modelo de turbulência LES de Smagorinsky. Objetiva-se desenvolver análises acerca da frequência de desprendimento de vórtices e geometria das estruturas dos turbilhões, por meio de visualizações das linhas e superfícies de contorno. Os resultados confirmam que o escoamento que flui pela extremidade livre interage com os vórtices de Kármán retardando o desprendimento dos vórtices, acarretando na formação de vórtices oblíquos. Os efeitos tridimensionais são mais significativos em estruturas de geometria troncocônica.
Palavras-chave: Fluido Dinâmica Computacional, Desprendimento de Vórtices, Seção Circular, Esbeltez Finita.

Abstract
Slender structures with a circular cross-section, such as towers and chimneys, are quite susceptible to the phenomenon of vortex shedding. Although these structures have a simple cross-section, there is a complex behavior associated with the flow separation and the physics of the near wake that in this case strongly depends on the Reynolds number. Three-dimensional effects are attributed to the free-end, variation in diameter with the height, and average wind velocity. For these reasons, the present study focuses on the development of high-fidelity numerical simulations of the flow around rigid fixed cylinder structures, considering two types of cross-section, uniform and tapered, infinite and finite cylinder, at high Reynolds numbers. The solution of the incompressible Navier-Stokes equations is obtained by 3D Computational Fluid Dynamics, considering Smagorinsky's LES turbulence model. The analyses are developed by the vortex shedding frequency and the eddies structures geometry from the contour lines and surfaces visualizations. The results confirm that the flow downstream of the free-end and the Kármán vortices are joined, delaying the vortices shedding and resulting in the formation of oblique vortices. The three-dimensional effects are more significant in tapered geometry structures.
Keywords: Computational Fluid Dynamics, Vortex Shedding, Circular Cross-section, Free-end.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas esbeltas de torres e chaminés comumente apresentam seções transversais circulares e estão, recorrentemente, submetidas a ação do vento, capaz de induzir significativas vibrações à estrutura em razão do fenômeno de desprendimento de vórtices. Embora essas estruturas tenham uma seção transversal simples, há um comportamento complexo associado à separação do escoamento e à física da esteira próxima que, neste caso, depende fortemente do número de Reynolds (*Re*). As características de escoamento tridimensional são frequentemente identificadas e atribuídas a muitas não uniformidades do escoamento e da estrutura em todas as faixas de números de Reynolds (Blevins, 1977), distinguindo-o do caso de cilindro infinito imerso em escoamento uniforme e permante (nominalmente escoamento bidimensional). A condição de esbeltez finita e a variação do diâmetro da seção transversal da estrutura são dois dos principais fatores que introduzem efeitos tridimensionais ao escoamento. Por estas razões, o comportamento do escoamento na esteira de estruturas circulares, em especial a formação de vórtices, tem sido amplamente investigado em trabalhos teóricos, numéricos e experimentais (Zdravkovich, 1997).

No caso de cilindros com comprimento finito, a deflexão do escoamento na extremidade livre poderá exercer uma interferência significativa no comportamento do escoamento na esteira. Tanaka e Murata (1999) investigaram experimentalmente cilindros finitos em quatro razões de esbeltez definido pela razão da altura H pelo diâmetro d (H/d = 1,25; 2,5; 5 e 10) e $Re = 3{,}7 \times 10^4$. Esses autores observaram que há uma interação entre o escoamento que flui pela extremidade livre com o par de vórtices de Kármán, unindo-os no topo do cilindro antes de serem destacados, conforme ilustra a Fig. 1. Adicionalmente, os autores verificaram que esta interação atrasa o desprendimento dos vórtices acarretando em uma inclinação na estrutura dos mesmos, resultando em vórtices oblíquos também identificados por Williamson (1989).

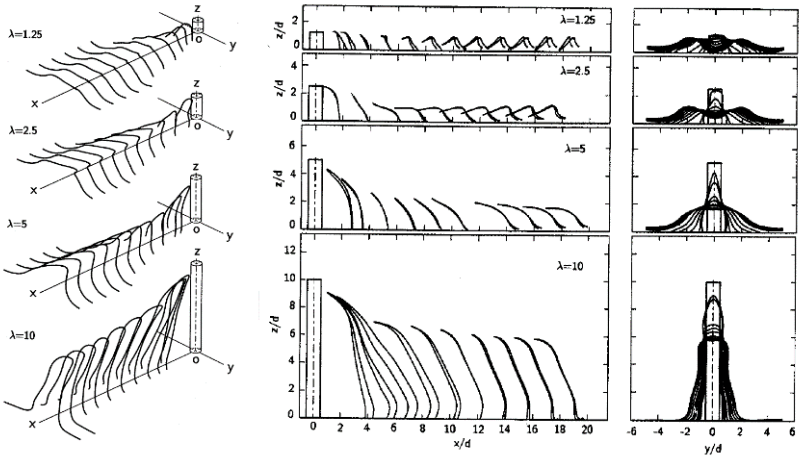

Figura 1 - Linhas de vórtices em cilindros de esbeltez finita (Tanaka e Murata, 1999)

Hsiao e Chiang (1998) conduziram estudos experimentais para cilindro de diâmetro constante e cilindro cônico sob escoamento uniforme na faixa de números de Reynolds 1×10^4 a $1{,}4\times10^4$. Foram observados autoespectros de velocidades transversal de largura de banda estreita para o caso cilindro circular uniforme, indicando o desprendimento de vórtices bem definido de frequência dominante ao longo do eixo do cilindro. Para a estrutura cônica, a frequência de desprendimento de vórtices varia por regiões, dando origem às chamadas células de vórtices. Os autores identificaram que a transição de uma célula para outra pode ser abrupta (para pequenos

valores de *Re*) ou suave (para elevados *Re*). No último caso, a região de transição de frequências será tão maior quanto forem as variações de frequência entre células.

Usualmente, as pesquisas relacionadas à ação do vento em estruturas são desenvolvidas por meio de medições "in situ" pouco frequentes ou modelos de escala reduzida em túnel de vento. Uma outra alternativa para análise do escoamento é a simulação numérica via CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*). Comparativamente aos experimentos de escala reduzida, a simulação via CFD facilita o estudo de problemas quando é considerada alguma mudança na configuração do modelo, bem como, quando se faz necessário realizar medições em pontos localizados em regiões de difícil acesso.

Nestes moldes, o presente trabalho apresenta simulações numéricas 3D de cilindros circulares e troncocônico fixos, infinitos e finitos, submetidos a um perfil de velocidade uniforme, com o objetivo de identificar a interferência do escoamento na extremidade e da variação de diâmetro no comportamento da esteira. O escoamento ao redor dos cilindros é modelado com as equações de Navier-Stokes incompressíveis em regime turbulento, simulando-se os efeitos dos grandes vórtices com o modelo de Smagorinsky.

2. TRATAMENTO COMPUTACIONAL

O software utilizado é uma ferramenta computacional para CFD baseada no método de elementos finitos de uso geral e denominada EdgeCFD (Cortes *et al*., 2020). Capaz de simular o escoamento incompressível regido pelas equações de continuidade (conservação da massa) e as equações de Navier-Stokes (conservação do momento/quantidade de movimento).

Emprega a formulação SUPS com estabilização LSIC para as equações de Navier-Stokes incompressíveis e a formulação SUPG com captura de descontinuidades para transporte escalar (Elias & Coutinho, 2007). O EdgeCFD pode usar o modelo de Smagorinsky para tratar a turbulência.

Esse código usa um algoritmo preditor-multicorretor de integração de tempo com passo de tempo adaptativo por um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Dentro do loop de solução de escoamento, os passos de multicorreção correspondem ao método de Newton Inexato. Nesta abordagem, o solver não-linear adapta a tolerância de acordo com a evolução do resíduo da solução. O sistema de equações lineares é solucionado via Método dos Resíduos Mínimos Generalizados (GMRES). Os cálculos são realizados em paralelo usando um paradigma de memória distribuída através da biblioteca de interface de troca de mensagens (MPI), usando comunicação ponto-à-ponto. As integrais no EdgeCFD são calculadas usando a formulação de derivadas na forma fechada em coordenadas volumétricas ou usando uma regra de integração de um ponto (centróide). Assim, todos os coeficientes nas matrizes e resíduos do elemento são explicitamente codificados.

A fim de evitar as instabilidades numéricas devido à simulação para elevados números de Reynolds, o software dispõe de uma função de incremento de velocidade que permite estabelecer uma rampa de crescimento do número de Reynolds fazendo uso de passos de tempo adaptativo, acelerando-se o fluido gradualmente até o número de Reynolds desejado.

3. MODELO NUMÉRICO

Os casos de escoamento em torno de cilindros circulares uniformes e troncocônicos consideram perfil de velocidade constante na entrada. O caso de cilindro troncocônico infinito foi estudado por Balasubramanian *et al.* (1998) e a validação do modelo numérico adotado no presente trabalho foi apresentada em Santos *et al.* (2018).

As características geométricas do domínio computacional 3D utilizado para os modelos estão representadas na Fig. 2 e os valores específicos são mostrados na Tabela 1.

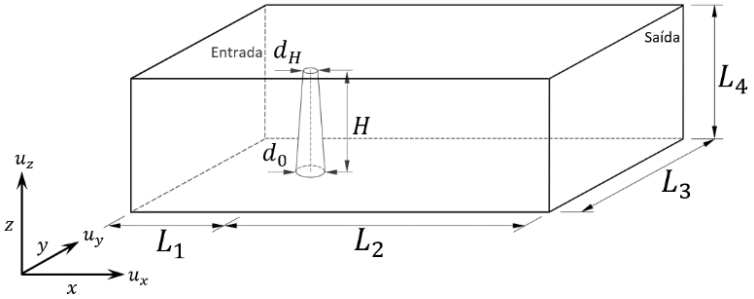

Figura 2 - Característica geométrica do domínio computacional

Tabela 1: Detalhes da característica geométrica do domínio computacional (em cm)

Caso	Cilindro	d_0	d_H	H	L_1	L_2	L_3	L_4
C-I	Circular Infinito	3,016	3,016	41,28	54,32	138,74	66,40	41,28
C-F	Circular Finito	3,016	3,016	41,28	54,32	138,74	66,40	61,92
T-I	Troncocônico Infinito	4,760	3,016	41,28	69,98	178,85	85,54	41,28
T-F	Troncocônico Finito	4,760	3,016	41,28	69,98	178,85	85,54	61,92

Um maior refinamento de malha nas regiões ao redor e atrás do cilindro possui significativa relevância para a simulação, uma vez que é nessas regiões que ocorrem os fenômenos de separação, refluxo e desprendimento de vórtices. Portanto, é utilizado um critério de refinamento da malha, garantindo uma maior densidade de elementos finitos nestas regiões, semelhante ao adotado em Santos *et al.* (2018). Para os modelos adotados, foram empregadas malhas geradas pelo software livre Gmsh[1], com as características listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características da malha

Caso	Cilindro	Nós	Elementos
C-I	Circular Infinito	1.491.945	8.866.632
C-F	Circular Finito	2.765.741	7.691.657
T-I	Troncocônico Infinito	1.301.844	16.594.218
T-F	Troncocônico Finito	2.428.115	14.491.134

As condições de contorno utilizadas nestes modelos consistem em uma condição de parede livre aplicada nas paredes superior e inferior, bem como em ambas as paredes laterais. Uma condição de pressão estática nula é aplicada no limite de saída e o perfil de velocidade $u_x(z)$ normalizado foi prescrito na entrada. O escoamento para o cilindro circular é caracterizado por $Re = 2{,}39 \times 10^4$. Para o cilindro troncocônico, houve uma variação no número de Reynolds de modo que na base foi simulado $Re = 3{,}78 \times 10^4$ e no topo $Re = 2{,}39 \times 10^4$. A rampa de número de Reynolds figurou na faixa de $5 < Re < 3{,}0 \times 10^4$, sendo o incremento definido com o auxílio da adaptatividade do passo de tempo. A simulação, de cada caso, utilizou aproximadamente 92 horas de processamento, para a malha particionada em 36 processos, reproduzindo 2000 segundos do tempo de simulação. Cabe observar que, em média, 34 destas horas foram requeridas

[1] http://geuz.org/gmsh/

para desenvolver a rampa de números de Reynolds utilizada e buscando garantir que todo o domínio do modelo estava submetido ao mesmo número de Reynolds.

4. RESULTADOS

A Fig. 3 ilustra resultados dos quatro casos analisados. À direita de cada quadro são mostrados os espectros de frequência da componente transversal de velocidade u_y obtidos pela aplicação da Transformada Rápida de Fourier aos históricos temporais da velocidade transversal do escoamento u_y ao longo de uma linha à jusante do cilindro e paralela ao seu eixo, com as seguintes distâncias: $x = 2{,}61d_m$ e $y = 0{,}85d_m$, onde d_m é o diâmetro médio do cilindro. A partir das frequências locais ($f(z)$), foi calculado o número de Strouhal médio definido como $St_m = f(z)d_m/u_x$, à esquerda de cada quadro da Fig. 3. A pequena variação da frequência e do número de Strouhal ao longo do eixo do cilindro caracteriza as células de vórtices enquanto as regiões intermediarias podem ser vistas como regiões de transição.

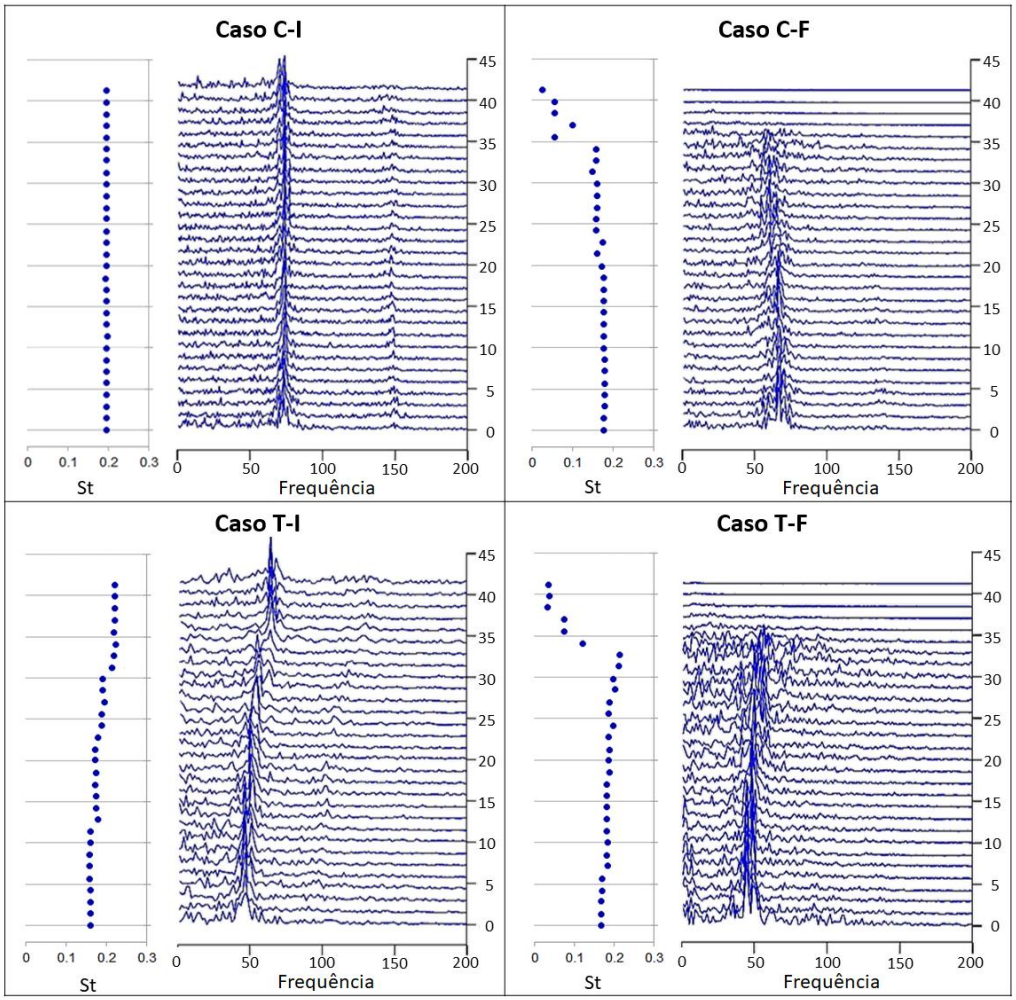

Figura 3. Número de Strouhal (esquerda) e espectro de frequência da velocidade u_y (direita) de cada um dos quatro casos analisados.

No caso C-I, a frequência de desprendimento de vórtices exibe uma distribuição uniforme bem definida permanecendo constante em 73,8Hz. Além disso, há uma segunda frequência de

cerca de 148,0Hz associada ao segundo harmônico. Observa-se um valor de número de Strouhal constante ao longo da altura de aproximadamente igual a 0,196, próximo ao valor esperado de 0,2 para escoamento nominalmente bidimensional no número de Reynolds na ordem de 10^4 (Blevins, 1977).

No caso C-F, verifica-se no espectro de u_y a ausência de pico de frequência na faixa superior, adjacente à extremidade livre, $z/d_H > 38/3$. Os efeitos de extremidade livre se estendem até a base, resultando em uma frequência igual a 66,4Hz, valor inferior ao do caso de comprimento infinito. A frequência constante pode ser verificada pelo alinhamento do número de Strouhal em 0,176 para $0 < z/d_H < 20/3$. A redução em relação ao caso C-I é atribuída ao efeito de extremidade livre, característica distintiva entre esses casos. A frequência secundária também apresenta uma redução e o não alinhamento dificulta sua identificação.

A variação do diâmetro (caso T-I) resulta em uma mudança nos ciclos de vórtices que apresentam maior frequência no topo, igual a 64,5Hz, se comparado com a base, de 47,0Hz. Assim como para o caso C-I, é possível identificar a ocorrência de frequência secundária, que variou de 128,9Hz a 94,1Hz entre o topo e a base. A partir das simulações, verificou-se que a transição do número Strouhal é de 0,220 no topo para 0,161 na base.

Os efeitos de extremidade livre são mais expressivos no caso T-F comparativamente ao caso C-F, de modo que as coordenadas $z/d_H > 35/3$ apresentam ausência de picos ou frequências não definidas. A frequência dominante na base é igual a 49,2Hz. Como os espectros de frequência têm banda larga, é difícil identificar visualmente faixas com frequência constante. Assim, os números de Strouhal proporcionam uma melhor identificação das células de vórtices. A região de baixa frequência tem valores de número de Strouhal pequenos e a região subsequente presenta uma perturbação consequente dos efeitos de extremidade livre. Em termos de comprimento das células de vórtices, é possível verificar que há uma alteração no comprimento das células de vórtices do caso T-I para o caso T-F, de modo que, para o caso T-I, o comprimento da célula da base é aproximadamente igual a $4d_H$ e, para o caso T-F, é de $2d_H$.

A Fig. 4 ilustra as linhas de contorno da componente transversal de velocidade ao longo da mesma linha que a Fig. 3 no intervalo de tempo de simulação entre $500 - 750$. A cor amarela representa o máximo local e a azul o mínimo local. Um padrão vertical denota uma região com a mesma frequência de vórtice e uma torção nas linhas de vórtice indica um deslocamento de vórtice, como identificado por Williamson (1989).

O alto nível de turbulência presente no caso C-I não permite que a translação dos vórtices ocorra de forma totalmente paralela, uma vez que o padrão vertical é interrompido por turbilhões de menor escala. No entanto, há uma tendência de desenvolvimento paralelo semelhante à associada a um cilindro circular 2-D. Os efeitos tridimensionais decorrentes da presença da extremidade livre (caso C-F) são evidenciados pela presença das regiões horizontais de mesma cor (velocidade constante) caracterizando a ausência ou baixa ocorrência de flutuações no escoamento transversal.

A variação linear do diâmetro interfere na formação de vórtices que não podem permanecer totalmente paralelos ao eixo do cilindro. No caso T-I, foram identificados 14 ciclos de vórtices no topo e 10 ciclos na base do cilindro. A estrutura da esteira foi fortemente afetada pelo escoamento na extremidade livre no caso T-F, para a qual foi identificada uma região horizontal superior ($z/d_H > 37/4$) sem velocidade transversal para todos os tempos e uma região adjacente ($34/3 < z/d_H < 37/4$) com velocidade quase nula. O deslocamento do vórtice pode ser visto entre $z/d_H = 15/3$ e $z/d_H = 20/3$, para o intervalo de tempo simulação entre 530-560.

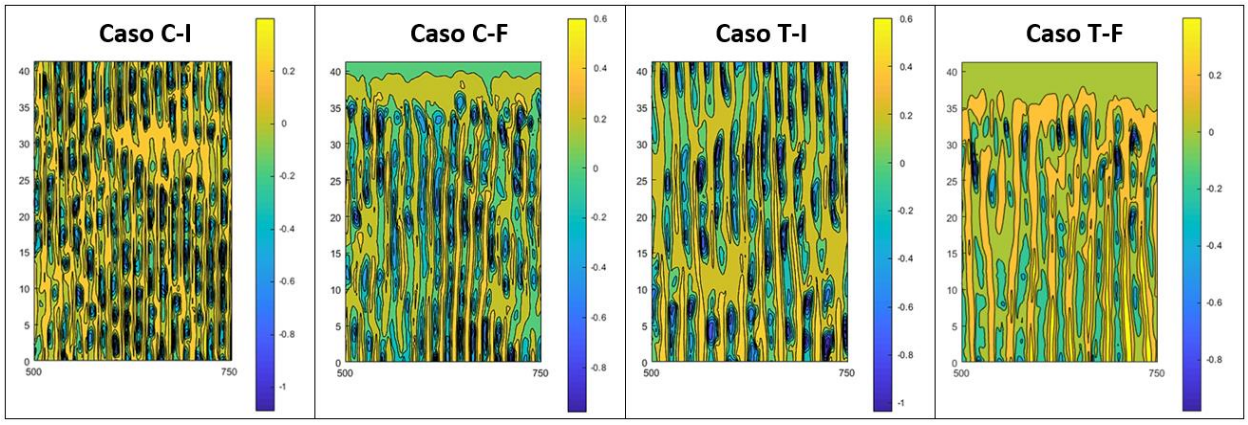

Figura 4. Visualização das linhas de contorno da velocidade transversal.

Cada quadro da Fig. 5 mostra, à esquerda, os contornos de velocidade transversal em quatro seções do domínio (z = 0, H/3, 2H/3 e H) e, à direita, a estrutura dos vórtices obtida pelo critério-Q (Haller, 2005), colorida pela velocidade (vista superior e 3D). Os contornos de velocidade transversal mostram um processo de desprendimento de vórtices com a vorticidade horária/negativa representada em tons de azul e a vorticidade anti-horária/positiva representada em tons de vermelho.

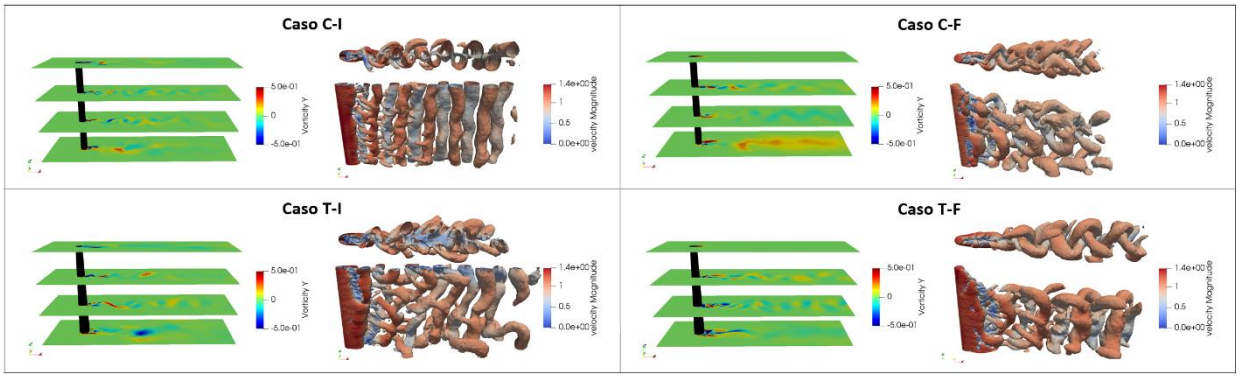

Figura 5. Velocidade transversal e isosuperfícies do critério-Q.

No caso C-I, é possível observar o padrão de formação e desprendimento de vórtices paralelo ao eixo da estrutura, semelhante ao identificado na Fig. 4. No entanto, a natureza turbulenta do escoamento (redemoinho de menor escala) gera distúrbios, resultando em pequenas distorções na estrutura vertical (Fig. 5 à direita), identificáveis pelo não alinhamento dos vórtices (Fig. 5 à esquerda). No caso C-F, a Fig. 5 à direita mostra o padrão oblíquo de formação e desprendimento de vórtices. A vista superior da estrutura dos vórtices permite visualizar a interação entre o escoamento na extremidade livre e o vórtice Kármán, conforme verificado por Tanaka e Murata (1999).

No caso T-I, o não alinhamento das regiões de vorticidade (Fig. 5 à esquerda) e o padrão oblíquo da estrutura de vórtices (Fig. 5 à direita) são provenientes da variação de diâmetro. A extremidade livre combinada com a variação do diâmetro (caso T-F) intensifica os efeitos tridimensionais, como resultado, há uma grande região sem escoamento transversal. Portanto, há uma redução no comprimento das estruturas de vórtices na esteira em relação ao cilindro circular (caso C-F), como pode ser visto na Fig. 5 à direita.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por foco o estudo do escoamento em torno de estruturas circulares e troncocônicas estacionárias, infinitas e finitas. As análises em termos de espectros de frequência e o número de Strouhal confirmaram a existência de células de desprendimento de vórtices de frequência constante ao longo da altura. A ocorrência de deslocamentos de vórtices ou divisões de vórtices é claramente identificada nas análises de visualização e de estrutura dos vórtices. O efeito da esbetez finita é verificado pela região de frequência tendendo para zero e velocidade transversal com valor médio quase nulo e que não apresentam flutuações. As estruturas de vórtices confirmam a interação entre o escoamento proveniente da extremidade livre com os vórtices de Kármán. Novas simulações estão sendo desenvolvidas envolvendo estruturas tronco-cônicas sob escoamento cisalhante turbulento, a elevados números de Reynolds.

AGRADECIMENTOS

A pesquisa relatada neste artigo foi apoiada pelo MCTI/CNPq e pela MEC/CAPES, agências brasileiras de desenvolvimento científico e tecnológico. O uso do supercomputador Lobo Carneiro foi possibilitado por intermédio Núcleo Avançado de Computação de Alto Desempenho da COPPE/UFRJ, projeto a16010.

REFERÊNCIAS

Balasubramanian, S., Haan JR., F. L., Szewczyk, A. A. and Skop, R. A. (1998). On the existence of a critical shear parameter for cellular vortex shedding from cylinders in nonuniform flow. Int. J. of Fluids and Structures, v. 12, p. 3-15.

Cortes, A. M. A., Lins, E. F., Guerra, G. M., Silva, R. M., Alves, J. L. D., Elias, R. N., Rochinha, F. A., Coutinho, A. L. G. A. (2020) EdgeCFD: a parallel residual-based variational multiscale code for multiphysics, Int. J. of Computational Fluid Dynamics, 34:7-8, 529-548.

Elias, R. N. and Coutinho, A. L. G. A., (2007). Stabilized edge-based finite element simulation of free-surface flows. Int. J. for Num. Meth. in Fluids vol. 54, p. 965-993.

Haller, G. (2005) An objective definition of a vortex, J. of Fluid Mechanics, v. 525, pp. 1-26.

Hsiao, F.B. and Chiang, C.H., (1998). Experimental study of cellular shedding vortices behind a tapered circular cylinder, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 17, p. 179-188.

Santos, M. L., Pfeil, M. S., Coutinho, A. L. G. A. (2018). Identificação de células de vórtices em torres esbeltas via simulação numérica de alta fidelidade. Anais da XXXVIII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Lima-Peru, Outubro.

Tanaka, S., Murata, S. (1999). An investigation of the wake structure and aerodynamic characteristics of a finite circular cylinder: time-averaged wake structures behind circular cylinders with various aspect ratios, JSME Int. Journal Series B, v. 42, n. 2, p. 178-187.

Williamson, C. H. K., (1989). Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake street wake of cylinders at low Reynolds numbers. Int. J. of Fluid Mechanics, vol. 206, p. 579-627.