

MODELO DE INTERAÇÃO FLUIDO ESTRUTURA PARA ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS SUJEITAS A AÇÃO DE ESCOAMENTOS

Gabriela Penna Bianchin¹, Alexandre Luis Braun²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil /
pbianchingabi@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil /
alexandre.braun@ufrgs.br

Resumo

Um modelo numérico para análise de interação fluido-estrutura (IFE) com escoamento incompressível e comportamento geometricamente não linear é apresentado neste trabalho. Para análise do escoamento será utilizada uma versão semi-implícita do método *Characteristic-Based Split* (CBS) no contexto do Método dos Elementos Finitos (MEF), onde elementos tetraédricos lineares são empregados para discretização do domínio espacial. A estrutura é analisada através de um modelo de casca em abordagem lagrangeana atualizada, considerando materiais com comportamento elástico linear e sujeitos a grandes deslocamentos e rotações e pequenas deformações. Para discretização da estrutura adota-se o elemento GPL-T9, com três nós e seis graus de liberdade por nó. Os algoritmos que compõem o código numérico são verificados usando-se problemas clássicos de IFE bidimensionais. Os resultados apresentados demonstram a eficiência da formulação aqui proposta.

Palavras-chave

Engenharia do Vento Computacional; Interação Fluido-Estrutura; Método dos Elementos Finitos; Estruturas deformáveis.

Introdução

A interação entre fluidos e estruturas desempenha um papel crucial em diversas aplicações de engenharia, especialmente na engenharia civil, onde estruturas mais esbeltas podem estar sujeitas a fenômenos aeroelásticos que induzem efeitos dinâmicos significativos. O fenômeno da interação fluido-estrutura (IFE) descreve a ação mútua entre um fluido (como o vento ou a água) e uma estrutura sólida (tais como edifícios, pontes, barragens, entre outros), em que as forças produzidas por um dos meios influenciam diretamente o comportamento do outro. Por consequência, a análise desse fenômeno é essencial para previsão e mitigação de acidentes e danos estruturais, assegurando a integridade e longevidade das construções. A simulação numérica é geralmente referida como uma ferramenta eficaz para investigar os efeitos da IFE, conforme destacado por Braun e Awruch (2009). Modelos computacionais precisos são capazes de simular esses fenômenos, possibilitando a exploração de vários cenários. Fundamentalmente, a interação fluido-estrutura (IFE) está associada a análises fortemente não-lineares, o que evidencia a complexidade envolvida na simulação de sistemas acoplados.

Neste contexto, este trabalho visa ao desenvolvimento de ferramentas numéricas de IFE para a análise de estruturas flexíveis, discretizadas em elementos de casca, imersas em escoamentos incompressíveis. O objetivo principal é obter um modelo de acoplamento para futuros estudos sobre comportamento de estruturas flexíveis, tais como as estruturas de tensegridade (*tensegrity*) e *spoilers* para mitigação de cargas aerodinâmicas e controle de vibrações. No presente modelo, as equações de escoamento são discretizadas usando o método CBS e um esquema semi-implícito.

Para a análise do escoamento na presença de corpos em movimento, uma formulação ALE (arbitrária lagrangeana-euleriana) é adotada para descrever o movimento de partículas de fluido, com um esquema de movimento de malha proposto e implementado por Teixeira (2001). O corpo sólido é tratado de acordo com a dinâmica dos sólidos como um corpo flexível, discretizado em elementos triangulares de casca em abordagem lagrangeana atualizada, considerando materiais com comportamento elástico linear e sujeitos a grandes deslocamentos e rotações e pequenas deformações. A discretização temporal é realizada implementando métodos implícitos de Newmark e α -Generalizado. Para a análise de problemas de IFE utiliza-se um modelo de acoplamento particionado explícito, onde soluções individuais para o fluido e a estrutura são obtidas de forma sequencial, empregando-se a técnica dos subciclos entre as soluções.

Formulação

Análise do Escoamento

No presente trabalho, o escoamento é considerado incompressível, constituído de um fluido newtoniano em condição isotérmica e sem transporte de massa ou calor. Portanto, as equações de Navier-Stokes e balanço de massa formam o sistema de equações do escoamento. As equações de Navier-Stokes são expressas usando coordenadas cartesianas ortogonais e descrição cinemática ALE, ou seja:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + (v_j - w_j) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad \text{in } \Omega^f \quad (1)$$

onde ρ_f é a massa específica do fluido, v_i são as componentes de velocidade do escoamento \mathbf{v} , w_j são as componentes do vetor de velocidade de malha \mathbf{w} , t denota o tempo, x_i são as componentes do vetor posição \mathbf{x} ao longo dos eixos coordenados x_i , g_i são as componentes do vetor aceleração da gravidade \mathbf{g} , p é a pressão termodinâmica e ν é o coeficiente de viscosidade cinemática.

Por fim, a equação de conservação de massa pode ser expressa considerando um fluido incompressível, da seguinte forma:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad \text{in } \Omega^f \quad (2)$$

O sistema de equações do escoamento é discretizado empregando-se uma versão semi-implícita do método CBS (*Characteristic-Based Split*) no contexto do Método dos Elementos Finitos (MEF), onde elementos tetraédricos lineares são utilizados. No primeiro passo, obtém-se uma primeira aproximação para o campo de velocidades resolvendo-se uma equação de balanço de momentum sem o termo de pressão. Já no segundo passo, é obtida a solução do campo de pressão a partir do campo de velocidades aproximado do primeiro passo. Por fim, no terceiro, o campo de velocidade é corrigido a partir do campo de pressão obtido anteriormente, sendo que na versão semi-implícita do método, a equação de massa é resolvida de forma implícita usando uma equação de Poisson (Nithiarasu *et al.*, 2016).

Passo 1: velocidade intermediária

$$\tilde{\mathbf{v}}_i = \mathbf{v}_i^n - \mathbf{M}_d^{-1} \Delta t \left[(\mathbf{A} + \mathbf{D}) \mathbf{v}_i - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{S}_v - \mathbf{f}_i \right]^n \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

Passo 2: cálculo da pressão

$$\mathbf{H} \mathbf{p}^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} \mathbf{G}_i^T \tilde{\mathbf{v}}_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

Passo 3: correção da velocidade

$$\mathbf{v}_i^{n+1} = \tilde{\mathbf{v}}_i - \mathbf{M}_d^{-1} \frac{\Delta t}{\rho} \left[\mathbf{G}_i \mathbf{p}^{n+1} + \frac{\Delta t}{2} (\mathbf{S}_p)_i \mathbf{p}^n \right] \quad (i=1,2,3) \quad (5)$$

onde \mathbf{v}_i é o vetor de velocidade avaliado nos nós, \mathbf{p} é o vetor nodal de pressão, \mathbf{M}_d representa a matriz de massa discreta, obtida da forma consistente da matriz de massa \mathbf{M} . As matrizes \mathbf{A} , \mathbf{D} , \mathbf{G} , e \mathbf{S} representam, respectivamente, as matrizes de advecção, difusão, gradiente e estabilidade da formulação.

O incremento global de tempo Δt é definido considerando-se o escoamento sob condições instantâneas observadas em nível de elemento, levando à seguinte expressão:

$$\Delta t = \min(\Delta t_{conv}, \Delta t_{dif}) \quad \text{com} \quad \Delta t_{conv} = \frac{l}{\|\mathbf{v}\|}; \quad \Delta t_{dif} = \frac{l^2}{2Re}; \quad (6)$$

onde l é o comprimento característico do elemento finito, \mathbf{v} é o vetor de velocidades nodais ao nível do elemento e Re é o número de *Reynolds*. Um coeficiente de segurança é aplicado ao incremento de tempo global obtido da Eq. (6), que geralmente varia de 0,5 a 2 de acordo com as características da malha e a complexidade do escoamento. Neste trabalho adota-se 0,5 para todas as simulações.

Algoritmo para movimento de malha

Em problemas IFE os deslocamentos ou deformações apresentadas pela estrutura podem ser considerados na formulação do fluido através de uma descrição arbitrária lagrangeana-euleriana (ALE), a qual consiste em delimitar uma região ao redor do corpo onde o movimento da malha do escoamento é arbitrário e independe das coordenadas materiais e espaciais. Já o fluido localizado fora dessa região é resolvido de forma puramente euleriana, onde o domínio de referência é fixo no espaço e a matéria move-se através dele (ver, por exemplo, Braun, 2002). Deste modo, a malha na região ALE deve mover-se conforme uma lei que estabeleça o campo de velocidades de malha w_j de tal forma que todos os elementos mantenham sua integridade. Assim, um esquema de movimento de malha proposto por Teixeira (2001) e adotado por Braun (2007) é empregado, onde as componentes do vetor velocidade de malha são obtidas da seguinte forma:

$$w_k^i = \frac{\sum_{j=1}^{NS} a_{ij} w_k^j}{\sum_{j=1}^{NS} a_{ij}} \quad (k=1,2,3) \quad (7)$$

na qual NS é o número de pontos de malha localizados nos limites do domínio ALE e a_{ij} são coeficientes de influência definidos entre os pontos de malha i e j , considerando que i refere-se a pontos de malha internos, passíveis de movimento, e j refere-se a pontos de malha sobre os limites do domínio ALE, onde $w_i = 0$. Os coeficientes de influência a_{ij} são obtidos por:

$$a_{ij} = (d_{ij})^{-n} \quad (8)$$

em que d_{ij} é a distância euclidiana entre os pontos i e j da malha e n é um parâmetro definido pelo usuário, o qual é escolhido de acordo com a amplitude dos deslocamentos do corpo imerso, a fim de evitar a distorção excessiva da malha. Valores usuais encontram-se no intervalo $1 \leq n \leq 4$.

Análise da Estrutura

O elemento GPL-T9 é utilizado neste trabalho para a discretização da estrutura. Este elemento foi primeiramente empregado por Zhang et al. (1998), posteriormente por Teixeira (2001) e Isoldi (2008), demonstrando rapidez e precisão na solução. O elemento aqui utilizado considera a rotação

no plano da superfície média do elemento Θ_{zi} (*drilling*), evitando a singularidade da matriz rigidez em elementos coplanares e aumentando a precisão numérica das variáveis de membrana, apresentando três nós e seis graus de liberdade por nó (três componentes de deslocamentos e três de rotação). A matriz de rigidez total do elemento é obtida pela superposição da matriz de membrana com a matriz de flexão (Teixeira, 2001).

Os deslocamentos de membrana são expressos da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \mathbf{H}_m \mathbf{u}_m^e \quad (9)$$

onde \mathbf{u}_m^e é o vetor de valores nodais de deslocamentos de membrana para cada elemento, dado por:

$$\mathbf{u}_m^e = [u_{xi} \quad u_{yi} \quad \Theta_{zi}]^T \quad (10)$$

sendo \mathbf{H}_m a função de interpolação de membrana, expressa através de:

$$\mathbf{H}_{mi} = \begin{bmatrix} L_i & 0 & H_{u\Theta_i} \\ 0 & L_i & H_{v\Theta_i} \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde:

$$H_{u\Theta_i} = \frac{1}{2} L_i (b_m L_j - b_j L_m), \quad H_{v\Theta_i} = \frac{1}{2} L_i (c_m L_j - c_j L_m), \quad b_i = y_i - y_m, \quad c_i = x_m - x_i \quad (i, j, m = 1, 2, 3) \quad (12)$$

Já os deslocamentos nodais de flexão são dados por:

$$w = \mathbf{H}_b \mathbf{u}_b^e \quad (13)$$

onde \mathbf{u}_b^e é o vetor de deslocamentos generalizados de flexão, descrito como:

$$\mathbf{u}_b^e = [w_i \quad \Theta_{xi} \quad \Theta_{yi}]^T \quad (14)$$

onde w_i é o deslocamento transversal, Θ_{xi} e Θ_{yi} as rotações nodais em torno dos eixos x e y, respectivamente, e \mathbf{H}_b é a função de interpolação de flexão, definida por:

$$\mathbf{H}_{bi} = [H_i \quad H_{xi} \quad H_{yi}] \quad (15)$$

Com:

$$H_i = L_i - 2F_i + (1 - r_j)F_j + (1 - r_m)F_m \quad (16)$$

$$H_{xi} = -\frac{1}{2} [b_m L_i L_j - b_j L_m L_i + (b_j - b_m)F_i + (r_j b_j + b_m)F_j + (r_m b_m - b_j)F_m] \quad (17)$$

$$H_{yi} = -\frac{1}{2} [c_m L_i L_j - c_j L_m L_i + (c_j - c_m)F_i + (r_j c_j + c_m)F_j + (r_m c_m - c_j)F_m] \quad (18)$$

$$F_i = L_i \left(L_i - \frac{1}{2} \right) (L_i - 1), \quad r_i = \frac{1}{l_{j-m}^2} (l_{i-m}^2 - l_{i-j}^2), \quad l_{i-j} = \sqrt{x_{i-j}^2 + y_{i-j}^2}, \quad x_{i-j} = x_i - x_j, \quad y_{i-j} = y_i - y_j \quad (i, j, m = 1, 2, 3) \quad (19)$$

O sistema de equações a ser solucionado deve considerar os efeitos da não linearidade geométrica e incluir os efeitos das forças de inércia e de amortecimento. Linearizando a equação do movimento de equilíbrio dinâmico pelo método de Newton-Raphson, se chega à expressão a seguir em nível global:

$$\mathbf{M}^{t+\Delta t} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}^{t+\Delta t} \dot{\mathbf{u}} + {}^t \mathbf{K} \Delta \mathbf{u} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^t \mathbf{F} \quad (20)$$

na qual \mathbf{M} é a matriz de massa consistente, com funções lineares iguais para todos os graus de liberdade de translação (ver Eq. (21)), \mathbf{C} é a matriz de amortecimento de Rayleigh (Bathe, 1996) (ver Eq. (22)), ${}^t \mathbf{K}$ é a matriz de rigidez tangente, que inclui as matrizes de rigidez linear e não-linear, ${}^{t+\Delta t} \mathbf{R}$ é o vetor de forças externas aplicadas no instante $t+\Delta t$, ${}^t \mathbf{F}$ é o vetor de forças nodais

equivalentes no instante t , ${}^{t+\Delta t}\ddot{\mathbf{u}}$ e ${}^{t+\Delta t}\dot{\mathbf{u}}$ são os vetores nodais de aceleração e velocidade e $\Delta\mathbf{u}$ representa o vetor de incremento de deslocamentos nodais do instante t ao instante $t+\Delta t$.

$$\mathbf{M} = h\rho_E \int_A \mathbf{H}_M^T \mathbf{H}_M dA \quad (21)$$

$$\mathbf{C} = \alpha_R \mathbf{M} + \beta_R \mathbf{K} \quad (22)$$

sendo que h é a espessura do elemento, ρ_E a massa específica da estrutura e α_R e β_R são as constantes de Rayleigh, obtidas a partir dos autovalores do sistema.

Do ponto de vista matemático, as equações de equilíbrio obtidas pela discretização através do MEF formam um sistema de equações diferenciais lineares de segunda ordem. Conforme Bathe (1996), a eficácia da análise depende em grande parte do procedimento numérico adotado na solução das equações de equilíbrio. Neste trabalho, para a análise dinâmica não linear emprega-se o método α -generalizado (mais informações em Braun, 2007).

Algoritmo para a análise da Interação Fluido-Estrutura

Nos problemas usuais de interação fluido-estrutura as propriedades físicas dos dois subsistemas diferem entre si. Além disso, usualmente intervalos de tempo para análise do escoamento são muito inferiores aos adotados para a estrutura devido à presença de efeitos altamente transientes e não lineares. Uma das alternativas para contornar o problema, adotada neste trabalho, é o emprego da técnica de subciclos. Em cada passo de tempo realizado pela estrutura de t^n a t^{n+1} , o fluido é analisado em um número de vezes de acordo com o fator $n_{F/E} = \frac{\Delta t_E}{\Delta t_F}$, ou seja, o número de

subciclos. Deste modo, a técnica permite uma economia no tempo de processamento, uma vez que o número de vezes em que a estrutura é analisada diminui e, por consequência, a necessidade de transferência de dados na interface fluido-estrutura, também.

O algoritmo particionado com subciclos adotado no presente trabalho consiste nos seguintes passos:

- (a) Definir as condições iniciais para a estrutura e o fluido;
- (b) Atualizar os deslocamentos, velocidades, acelerações e tensões da estrutura;
- (c) Atualizar as velocidades do fluido e pressão usando subciclos;
- (d) Calcular nova malha levando em consideração o movimento estrutural;
- (e) Atualizar as variáveis do escoamento com novas condições de contorno;
- (f) Atualizar as variáveis da estrutura de acordo com a nova carga do fluido;
- (g) Repete-se os passos de (c) a (f) até a solução completa.

Aplicações Numéricas

I. Painel horizontal sujeito aos vórtices de um prisma retangular

Esta aplicação trata da simulação dos efeitos de interação fluido-estrutura (IFE) em um painel flexível submetido a vórtices induzidos por um escoamento laminar incompressível ao redor de um prisma quadrado rígido, ao qual o painel está fixado. Inicialmente simulado por Wall e Ram (1998), esta aplicação tornou-se um teste conhecido para verificar códigos numéricos de IFE. A Figura 1 apresenta a malha de elementos finitos utilizada na análise do escoamento com as respectivas condições de contorno e informações detalhadas sobre as características geométricas do domínio computacional. A malha para o fluido foi construída utilizando 324.003 elementos tetraédricos e 108.862 nós na forma não estruturada. A menor dimensão do elemento é cerca de 2×10^{-2} m, referindo-se aos elementos em contato com a superfície do painel. Por sua vez, a malha do painel é constituída por 180 elementos triangulares de casca e 182 nós, adotando-se a compatibilidade com a malha do fluido, conforme evidenciado na Figura 1. Ademais, para ambas as malhas apenas um

elemento é utilizado ao longo da espessura (eixo y), transversal ao escoamento, por tratar-se de um problema com comportamento 2D.

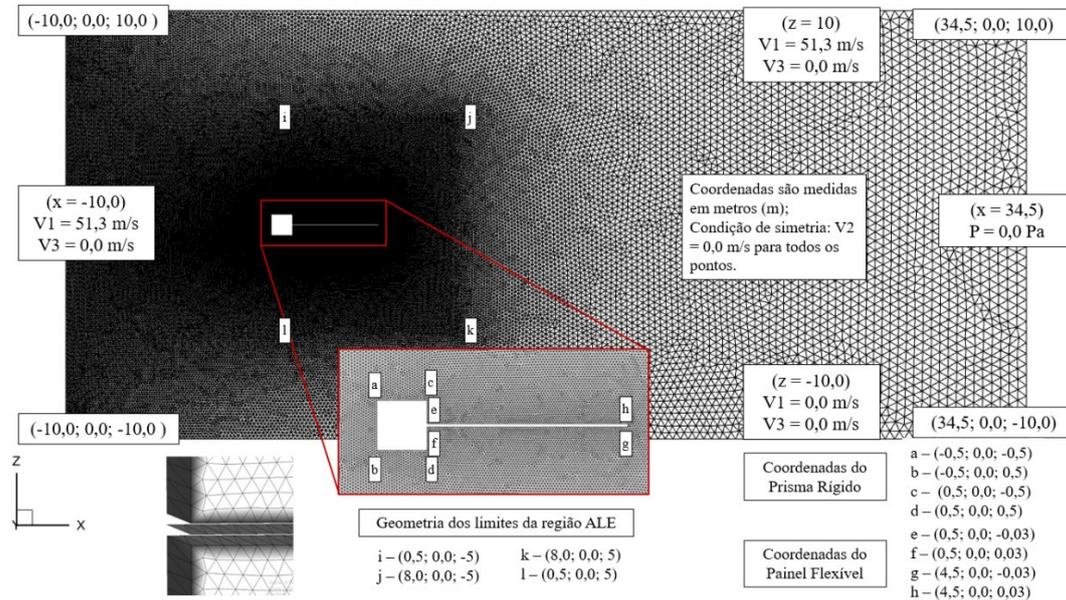


Figura 1 – Características geométricas, malha e condições de contorno empregadas para a análise de um painel flexível sujeito a vórtices.

As constantes físicas e geométricas empregadas na presente análise são as seguintes para o fluido: massa específica (ρ_f) = $1,18 \times 10^{-3}$ kg/m³; viscosidade dinâmica (μ) = $1,82 \times 10^{-4}$ Ns/m²; velocidade característica = 51,30 m/s; dimensão característica = 1,00 m; passo de tempo (Δt_f) = 4×10^{-5} s. Enquanto que para a estrutura (painel horizontal) utiliza-se: massa específica (ρ_e) = $1,0 \times 10^{-1}$ kg/m³; módulo de elasticidade (E) = $2,50 \times 10^6$ N/m²; coeficiente de Poisson (ν) = 0,35; raio espectral (r_α) = 0,6; passo de tempo (Δt) = 16 subciclos $\times \Delta t_f$. O escoamento é caracterizado por um número de Reynolds (Re) igual a 332,6. É importante notar que o escoamento é desenvolvido inicialmente considerando a estrutura rígida e indeformável por um certo período, até que o campo de velocidades e pressão esteja estável o suficiente para que a estrutura seja liberada.

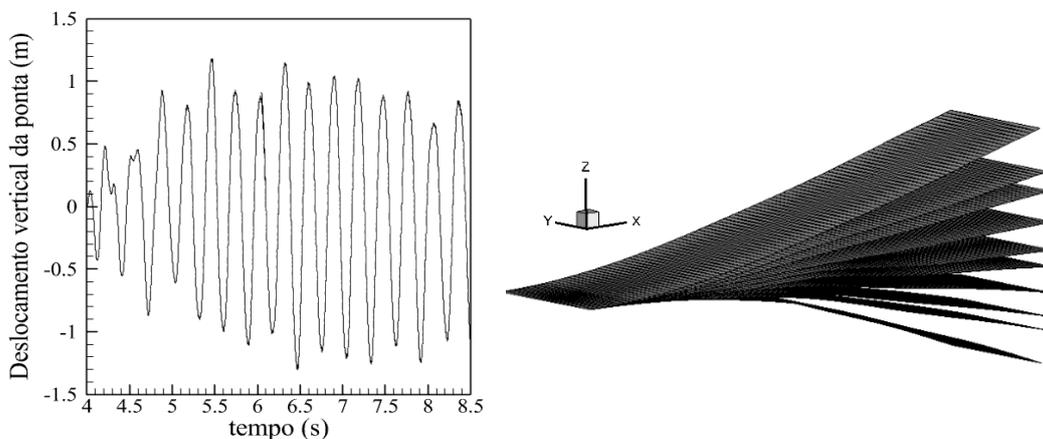
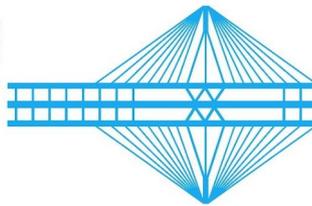


Figura 2 – Deslocamento vertical da ponta do painel horizontal.

O movimento de oscilação do painel horizontal é induzido pelo desprendimento de vórtices gerados quando o escoamento atinge o prisma (corpo rígido). O histórico temporal do deslocamento vertical na extremidade do painel é apresentado na Figura 2, junto com as configurações deformadas da



malha. Embora algumas diferenças sejam observadas na primeira fase da resposta estrutural, onde o acoplamento entre a frequência natural do painel não está totalmente desenvolvido, uma concordância aceitável é verificada em termos de amplitude de deslocamento e período de oscilação, ao longo do tempo, quando comparado às referências. Na Tabela 1 é possível observar essa concordância, a partir dos valores de pico de deslocamentos verticais (máxima amplitude) e período de oscilação.

Já na Figura 3 é possível observar três campos de vorticidade e pressão instantâneos referentes a momentos em que as amplitudes máximas são alcançadas e quando uma configuração aproximadamente indeformada é obtida. Na face frontal do prisma zonas de pressão positiva (sobrepessão) são criadas devido a exposição direta ao escoamento do fluido. Nas faces laterais vórtices são formados alternadamente no topo e base, o que leva a maiores oscilações no painel horizontal quando a frequência do despreendimento de vórtices se aproxima da frequência natural de vibração da estrutura. Os valores encontrados nos campos de pressão estão em concordância com as referências expostas na Tabela 1. Assim, embora a resposta estrutural seja altamente não-linear, a malha proposta para o fluido acompanha as deformações do painel, sem distorções excessivas dos elementos tetraédricos, evidenciando o bom desempenho do esquema de movimentação de malha adotado aqui.

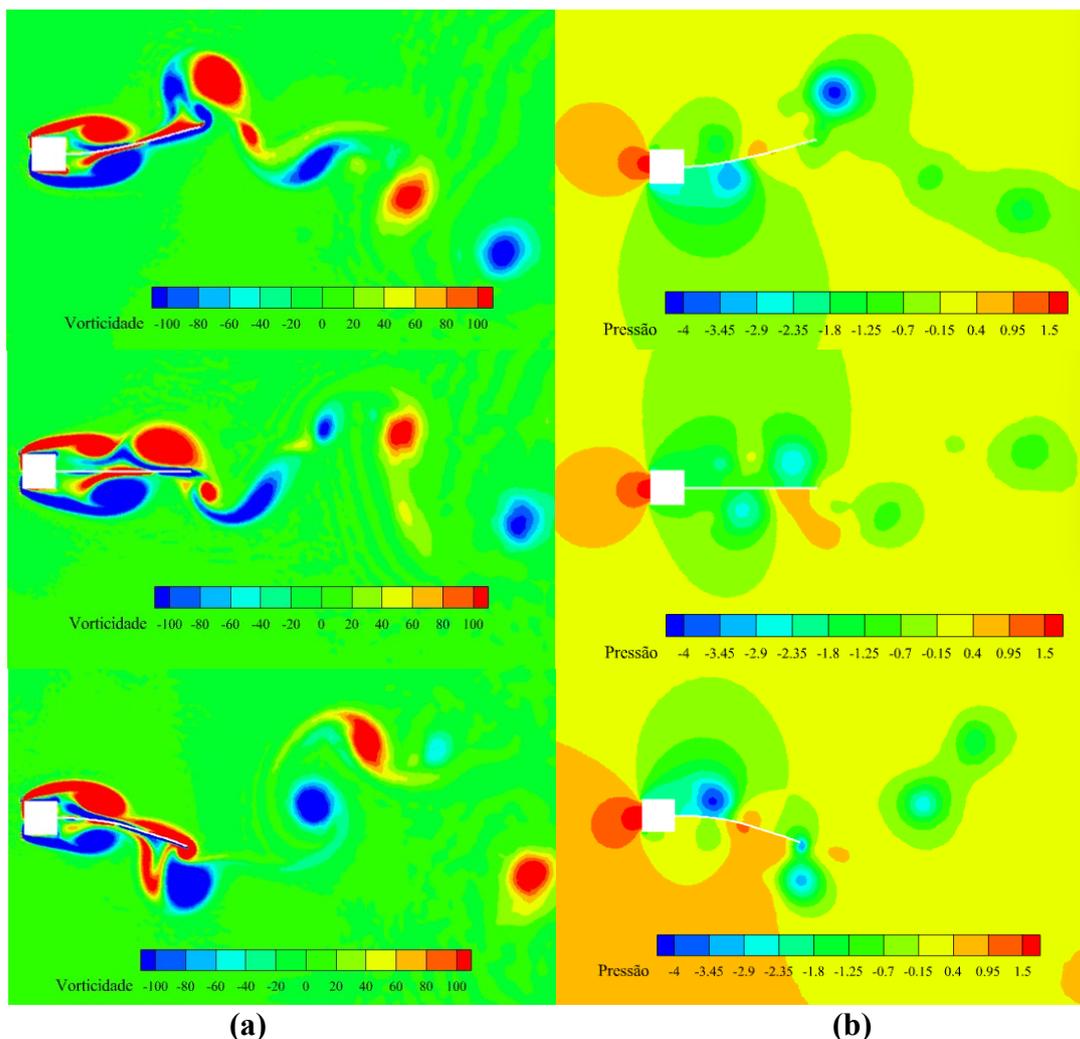


Figura 3 – Campos instantâneos de (a) vorticidade e (b) pressão.

Tabela 1 – Amplitude máxima e período de oscilação do painel horizontal em comparação com referências.

Referência	Amp. máx.	Período de Oscilação
Wall e Ramm (1998)	1,301	0,320
Habchi <i>et al.</i> (2013)	1,020	0,325
He e Zhang (2017)	1,400	0,322
Oliver <i>et al.</i> (2009)	1,250	0,320
Braun e Awruch (2009)	1,305	0,326
Teixeira (2001)	1,500	0,350
Presente trabalho	1,303	0,310

II. Painel vertical flexível em um canal uniforme

Esta aplicação trata da simulação de um painel vertical flexível em um canal com escoamento uniforme. A Figura 4 apresenta a malha de elementos finitos utilizada na análise do escoamento com as respectivas condições de contorno e informações detalhadas sobre as características geométricas do domínio computacional. Uma malha não estruturada foi construída para o fluido utilizando 167.427 elementos tetraédricos e 56.532 nós. A menor dimensão do elemento é cerca de $2,5 \times 10^{-2} \text{m}$, referindo-se aos elementos em contato com a superfície do painel vertical. Por sua vez, a malha da estrutura em elemento de casca é constituída por 80 elementos triangulares e 82 nós, adotando-se a compatibilidade com a malha do fluido, conforme evidenciado na Figura 4. Ademais, para ambas as malhas apenas um elemento é utilizado ao longo da espessura (eixo y), transversal ao escoamento, por tratar-se de um problema com comportamento 2D.

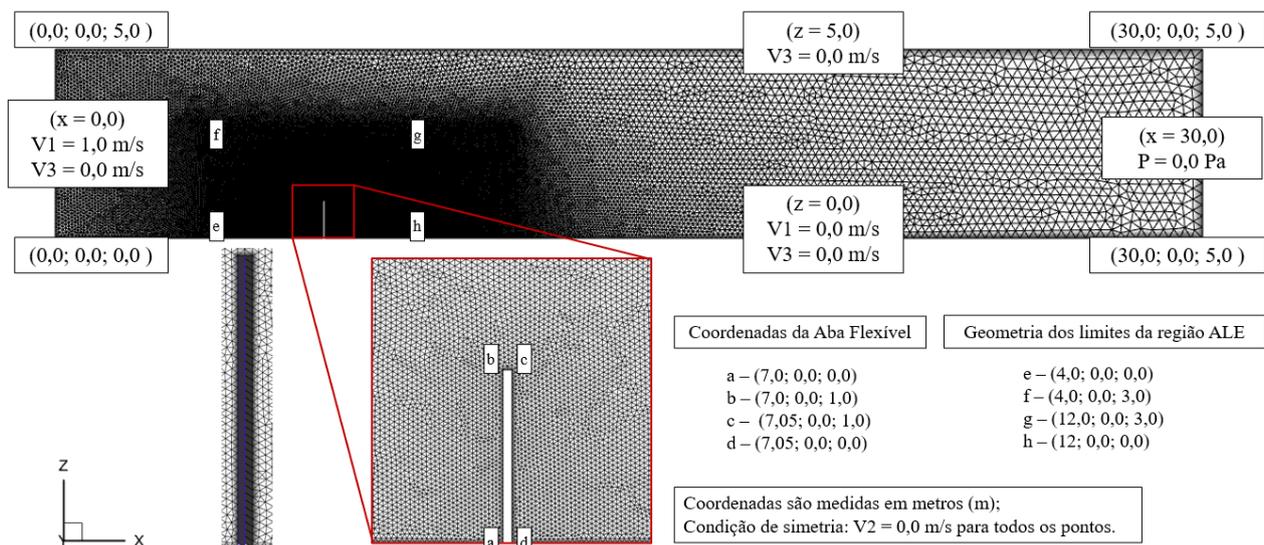


Figura 4 – Características geométricas, malha e condições de contorno empregadas para a análise de uma aba flexível em um canal.

As constantes físicas e geométricas empregadas na presente análise são as seguintes para o fluido: massa específica (ρ_f) = $1,0 \text{ kg/m}^3$; viscosidade dinâmica (μ) = $1,0 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$; velocidade característica = $1,0 \text{ m/s}$; dimensão característica = $1,00 \text{ m}$; passo de tempo (Δt_f) = $5 \times 10^{-3} \text{ s}$. Para a estrutura utiliza-se: massa específica (ρ_e) = $1,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; módulo de elasticidade (E) = $6,0 \times 10^4 \text{ N/m}^2$; coeficiente de Poisson (ν) = $0,45$; raio espectral (r_α) = $0,6$; passo de tempo (Δt) = 10 subciclos $\times \Delta t_f$. O escoamento é caracterizado por um número de Reynolds (Re) igual a 1000. É importante

notar que o escoamento é desenvolvido inicialmente considerando a estrutura rígida e indeformável até 100 segundos físicos serem obtidos, garantindo que o campo de velocidade e pressão esteja desenvolvido e estável para que possa ser liberada.

Na Figura 5 é possível observar o deslocamento horizontal da aba em comparação aos resultados obtidos por Oliver et al. (2009) e He e Zhang (2017), onde oscilações decrescentes são observadas. Esse fenômeno é explicado porque a densidade estrutural é muito alta e, como as vibrações da aba são excitadas pela inércia estrutural, o fluido atua como um oscilador amortecido e em pouco tempo as oscilações tendem a se tornar fracas. De modo geral os resultados apresentam boa concordância em comparação às referências. Por fim, na Figura 6 são apresentados alguns campos instantâneos de velocidade e pressão, evidenciando mais uma vez o bom desempenho do esquema de movimento de malha adotado, uma vez que a malha proposta para o fluido acompanha as deformações do painel vertical, sem distorções excessivas dos elementos tetraédricos.

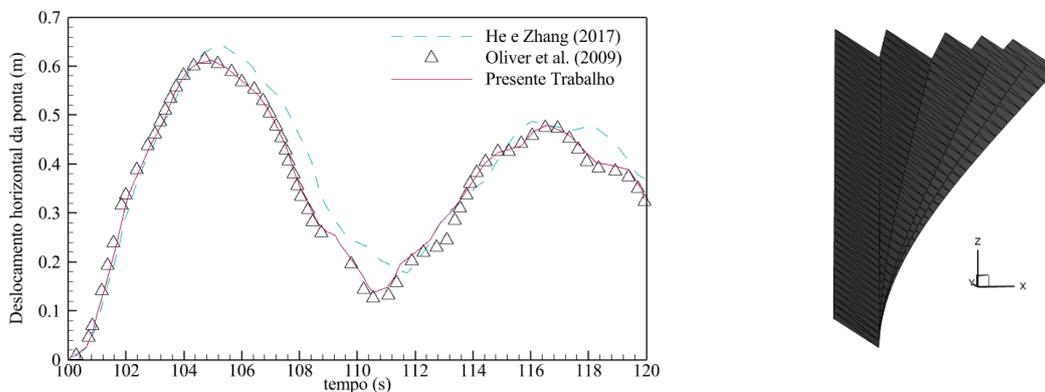


Figura 5 – Deslocamento horizontal do painel vertical.

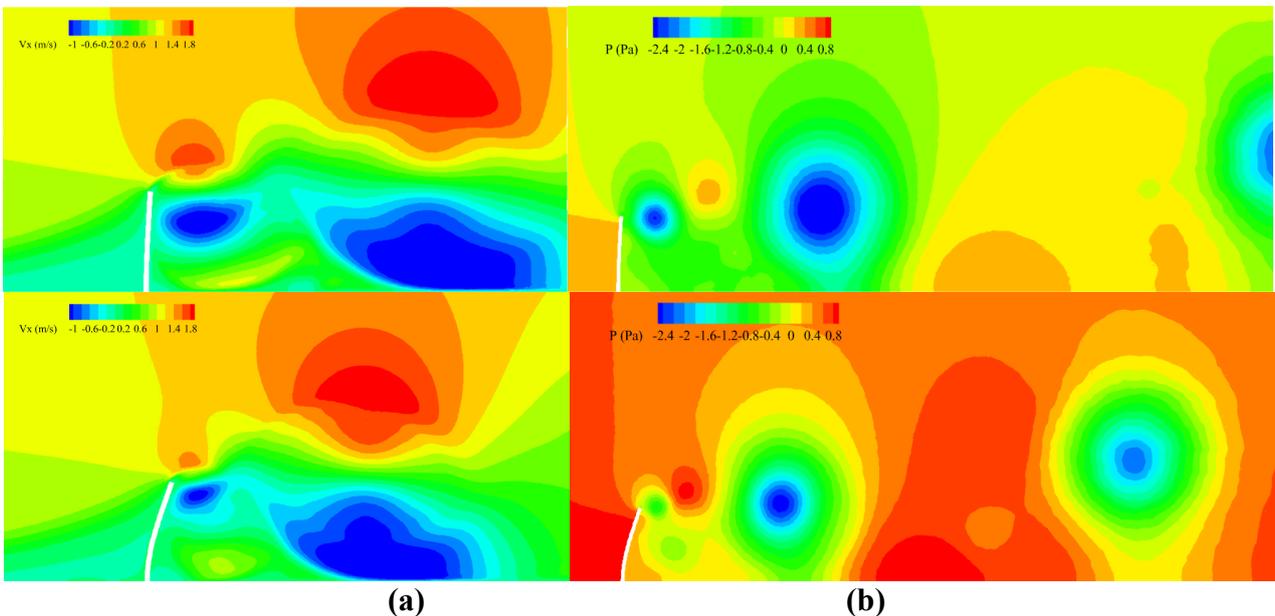


Figura 6 – Campos instantâneos de (a) velocidade e (b) pressão.

Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um modelo numérico para simulações de interação fluido-estrutura (IFE). Foram desenvolvidas formulações de elementos finitos para os subsistemas fluido e estrutura

utilizando elementos tetraédricos lineares e de casca triangulares, respectivamente. Um modelo de acoplamento particionado é adotado para análise de escoamentos incompressíveis e estruturas com comportamento elástico geometricamente não-linear. Algoritmos com subciclos foram utilizados para otimizar o processo, resultando em um tratamento eficiente das rotinas relacionadas a transferência de dados entre as interfaces de estrutura e fluido. O presente modelo foi verificado através de exemplos bidimensionais, clássicos da IFE, os quais apresentaram resultados consistentes com as referências. A partir dos resultados obtidos, observou-se que o esquema semi-implícito CBS aqui adotado, assim como a formulação da estrutura, o seu acoplamento com o fluido e o esquema de movimento de malha apresentaram desempenho adequado, mesmo com a alta não-linearidade presente. Neste sentido, os diferentes métodos numéricos propostos neste trabalho, quando acoplados, apresentaram resultados condizentes com aqueles esperados para o problema acoplado analisado.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro a esta pesquisa em andamento.

Referências

- BATHE, K. J. Finite Element Procedures. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- BRAUN, A. L. Um modelo para a simulação numérica da ação do vento sobre seções de ponte. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- BRAUN, A. L. Simulação numérica na engenharia do vento incluindo efeitos de interação fluido-estrutura. Porto Alegre: UFRGS, 2007. 283 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M. A partitioned model for fluid-structure interaction problems using hexahedral finite elements with one-point quadrature. International Journal for Numerical methods in Engineering, vol. 79, p. 505-549, 2009.
- HABCHI C.; RUSSEIL, S.; BOUGEARD, D.; HARION, J. L.; LEMENAND, T.; GHANEM, A.; VALLE, D.D.; PEERHOSSAINI, H. Partitioned solver for strongly coupled fluid-structure interaction. Comput Fluids. Vol. 71, p. 306-319, 2013.
- HE, T.; ZHANG, K. An overview of the combined interface boundary condition method for Fluid-Structure Interaction. Arch Computat Methods Engineering. Vol. 24, p. 891-934, 2017.
- ISOLDI, L. A. Análise estática e dinâmica de estruturas delgadas de materiais compostos laminados incluindo materiais piezelétricos. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 223 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- NITHIARASU, P.; LEWIS, W. R.; SEETHARAMU, K. N. Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Mass Transfer, 2th ed., Wiley Series in Computational Mechanics, 2016.
- OLIVIER, M.; DUMAS, G.; MORISSETTE, J. A fluid-Structure interaction solver for nano-air-vehicle flapping wings. In: Proceedings of the 19th AIAA computational fluid dynamics conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, San Antonio, Texas, p. 1-15, 2009.
- TEIXEIRA, P. R. F. Simulação numérica da interação de escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis e estruturas deformáveis usando o Método dos Elementos Finitos. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 237 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- WALL, W. A.; RAMM, E. Fluid-structure interaction based upon a stabilized (ALE) finite element method. Proceedings of the 4th world congress on computational mechanics. Barcelona, p. 1-20, 1998.
- ZHANG, Q.; UM, L.; ENQL, K. Geometric non-linear analysis of space shell structures using generalized conforming flat shell elements – for space shell structures. Comput. Fluids, v. 14, pp. 941-957, 1998.