

COMPORTAMENTO AERODINÂMICO DE ESTRUTURA DE PONTE COM SEÇÃO ALTERADA PELA PRESENÇA DE VEÍCULOS

Sergio Rafael C. de Oliveira^a, Patrícia H. Hallak^b, Michele S. Pfeil^c, Paulo Augusto B. de Sampaio^d

^a*Universidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Engenharia Civil, Avenida Alberto Lamego, 2000 – Parque Califórnia, CEP: 28013-602, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, cortes.engenheiro@gmail.com*

^b*Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional, Campus Universitário de Martelos - Martelos, CEP:36033-360, Juiz de Fora, MG, Brasil, patriciahallak@yahoo.com*

^c*Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Prédio do CT – sala I216, Cidade Universitária – Ilha do Fundão, CEP: 21945-970, Caixa-Postal: 68506, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, mpfeil@coc.ufjf.br*

^d*Comissão Nacional de Energia Nuclear, Via 5, s/n, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, CEP: 21945-970, Caixa-Postal: 68550, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, sampaio@ien.gov.br*

Palavras chave: pontes, dinâmica dos fluidos, comportamento aerodinâmico.

Resumo: Estruturas de pontes flexíveis são freqüentemente suscetíveis a ação dinâmica do vento, apresentando os chamados fenômenos aeroelásticos causados pela interação entre as forças inerciais elásticas e as aerodinâmicas. A ocorrência desse tipo de oscilação pode gerar danos estruturais e desconforto aos usuários. Tradicionalmente, o estudo dos efeitos dinâmicos do vento em estruturas era feito apenas através de experimentos em túneis de vento. Atualmente utilizam-se também análises em modelos numéricos por meio da fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*). Utilizando uma ferramenta computacional em dinâmica dos fluidos, pretende-se, no presente trabalho, avaliar os efeitos do vento no comportamento aerodinâmico da ponte Rio-Niterói, quando esta tem seu perfil não aerodinâmico alterado pela presença de veículos de grande porte. Registros mostram que a presença de veículos de grande porte altera o seu perfil tornando mais intensa a oscilação da ponte induzida pelo desprendimento cadenciado de vórtices. Os resultados são apresentados em termos dos coeficientes aerodinâmicos de força e do número de Strouhal, para a seção da ponte e dos veículos e para a seção conjunta ponte mais veículo.

1 - INTRODUÇÃO

As estruturas de pontes estão freqüentemente sujeitas à ação do vento. Algumas delas não desenvolvem forças inerciais quando sujeitas a ação do vento que pode ser considerado como praticamente um carregamento estático equivalente à resultante das pressões em sua superfície. Outras desenvolvem forças inerciais e vibram devido à ação do vento, surgindo então os fenômenos aeroelásticos que podem comprometer a segurança da estrutura.

Um exemplo interessante de vibrações causadas pelo vento é o da ponte Presidente Costa e Silva, mais conhecida como Ponte Rio-Niterói. Esta apresentava oscilações no primeiro modo de flexão vertical induzida pelo desprendimento cadenciado de vórtices em ressonância com a sua freqüência fundamental, o que ocorria para velocidades médias de 55 a 60 km/h, sustentadas por alguns minutos. Essas oscilações eram motivos de grande preocupação e desconforto aos usuários e, por este motivo, a ponte era fechada ao tráfego sempre que os ventos atingiam 50 km/h.

Registros de 16 de outubro de 1997 mostram que as amplitudes do movimento da ponte sem veículos chegaram a aproximadamente 50 centímetros em modo de flexão vertical. Anos mais tarde, foram registradas amplitudes bem maiores e em um evento em que veículos de grande porte, como ônibus e caminhões, continuaram trafegando em baixa velocidade sobre a faixa mais a barlavento da ponte durante a ocorrência das oscilações. Esta fileira de veículos altos alterou o perfil aerodinâmico da ponte, possivelmente contribuindo para as maiores amplitudes de oscilações registradas em relação às amplitudes de eventos da ponte sem veículos.

Este problema de vibração da ponte Rio-Niterói foi minimizado com a utilização de sistema de Atenuadores Dinâmicos Sincronizados (ADS) instalado no interior dos caixões metálicos, que consiste em 32 conjuntos de molas e contrapesos em aço que totalizam 120 mil quilos. Quando a ponte entra em vibração, esse sistema atua na neutralização das oscilações da estrutura. Detalhes sobre o sistema de controle de vibrações instalados na ponte podem ser obtidos em Battista e Pfeil (2010).

Todavia, mesmo com a atenuação das vibrações, há ainda a preocupação em compreender o comportamento aerodinâmico da ponte com ação do vento principalmente quando esta teve seu perfil aerodinâmico alterado pela presença de veículos de grande porte.

Inúmeras técnicas, experimentais e numéricas, têm sido empregadas para compreender os efeitos aerodinâmicos do vento em estruturas. Dentre elas cita-se a dinâmica dos fluidos computacional (*CFD - Computational Fluid Dynamics*) que tem apresentado resultados promissores. O presente trabalho corrobora com esta tendência com a finalidade de compreender os efeitos aerodinâmicos do vento em determinados perfis, em especial o da ponte Rio-Niterói na presença de veículos de grande porte.

Todavia, para a utilização da CFD para a estrutura em questão um dos principais desafios diz respeito à modelagem numérica da turbulência, uma vez que o número

de Reynolds atinge o valor aproximado de 10^7 . Desta forma, o vento, mesmo de incidência laminar, torna-se turbulento ao interagir com a estrutura.

O estudo numérico do escoamento na presente pesquisa é feito, portanto, através de uma metodologia conhecida como simulação das grandes escalas (LES - *Large Eddy Simulation*) que simula (resolve) numericamente essas grandes escalas enquanto modela as pequenas escalas (não resolvíveis) através de modelos adicionais, denominados modelos sub-malhas. Para isso, é feita a filtragem das equações de Navier-Stokes para se obter as equações das grandes escalas de movimento. Dentre os modelos sub-malha para a modelagem desse termo está o desenvolvido por De Sampaio e Coutinho (1999) no qual a modelagem é feita combinando-se uma formulação estabilizada de elementos finitos com algoritmos adaptativos no espaço e no tempo. As pequenas escalas do problema são modeladas internamente pela própria formulação estabilizada sendo, por isso, denominado de LES *com modelo sub-malha numericamente implícito*.

No próximo item é feita uma abordagem do problema aerodinâmico da ponte. Na seqüência são apresentadas as equações de Navier-Stokes de conservação de quantidade de movimento e conservação de massa, bem como uma visão geral do método LES, com a modelagem sub-malha associando o passo de tempo local com o remalhamento. Ao final são apresentados os resultados obtidos da simulação bidimensional de alguns perfis não aerodinâmicos e, em especial, o da ponte Rio Niterói em repouso carregada com dois veículos de grande porte (caminhão basculante e caminhão baú).

2 - A PONTE RIO-NITERÓI E SEU PROBLEMA FRENTE À AÇÃO DINÂMICA DO VENTO

A ponte Rio-Niterói serve como a principal ligação da capital Rio de Janeiro com Niterói e o interior do Estado. A ponte tem 13 quilômetros de extensão e o seu vão central encontra-se a 70 metros acima do nível da água. A Figura 1 mostra uma foto do vão central visto do Aeroporto Santos Dumont.

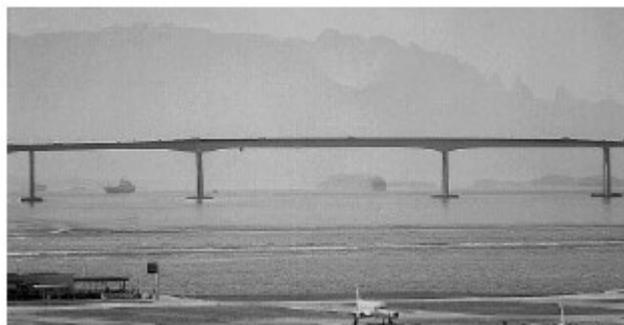


Figura 1: Vista da ponte pelo aeroporto Santos Dumont (Battista e Pfeil, 2000).

O trecho central é constituído por duas vigas contínuas metálicas celulares com vão central de 300 metros e vão laterais de 200 metros, porém a estrutura metálica central totaliza 848 metros, como mostrado na Figura 2. Na Figura 3, tem-se a

representação em corte da seção transversal da estrutura metálica no trecho de altura constante com 180 m de comprimento no vão central da ponte conforme ilustrado na Figura 2.

A ponte está bastante suscetível aos ventos que se aproximam pelo sudoeste e podem apresentar valores médios entre 50 e 60 km/h. A frequência natural de vibração da estrutura original era 0,32 Hz em modo de flexão vertical. Como não há obstáculos próximos, o escoamento incidente é considerado suave (baixa turbulência). Na Figura 4, pode ser visualizada a localização da ponte Rio-Niterói na Baía de Guanabara.

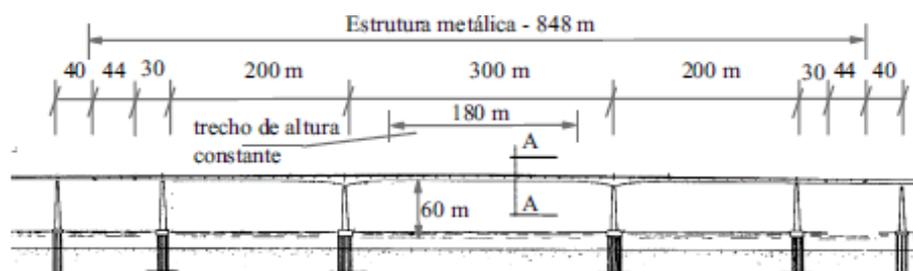


Figura 2: Elevação dos vãos centrais da ponte Rio-Niterói (Battista e Pfeil, 2000).

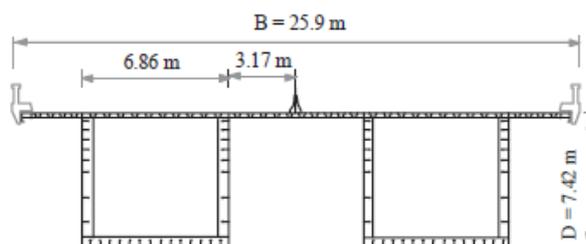


Figura 3: Seção transversal da ponte - corte A-A da Figura 2 – da estrutura metálica da ponte Rio-Niterói (Battista e Pfeil, 2000).

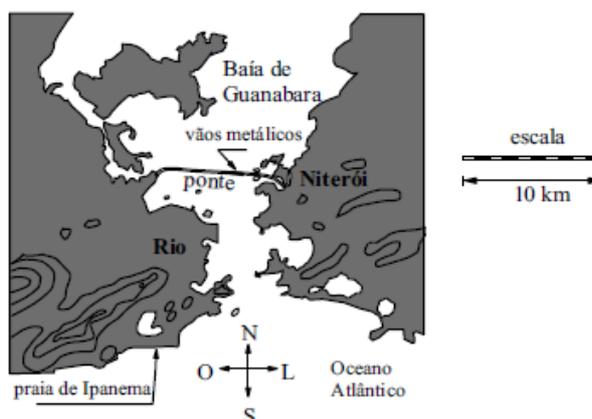


Figura 4: Localização dos vãos metálicos da ponte Rio-Niterói (Battista e Pfeil, 2000).

Em geral, nos eventos de grande oscilação o tráfego era interrompido ou os motoristas, receosos, aguardavam o fim da oscilação dos vãos metálicos; desse modo a oscilação se dava para a ponte sem o tráfego de veículos.

Registros mostram que nestas condições a ponte oscilava com amplitudes de até 50 cm em modo de flexão vertical associado à frequência igual a 0,32 Hz. Desde sua inauguração há mais de trinta anos a ponte vinha apresentando eventos de oscilação induzida por desprendimento cadenciado de vórtices. Esse fenômeno é causado pelos vórtices gerados do descolamento do fluido na superfície do corpo. Esse descolamento, dependendo da dimensão da estrutura, da velocidade e viscosidade do fluido, pode ocorrer de forma cadenciada e a vibração com grandes amplitudes da estrutura acontece quando a frequência de desprendimento de vórtices se aproxima da frequência natural da estrutura.

Anos mais tarde, em um evento caracterizado pela presença, na faixa mais a barlavento, de uma fileira de veículos de grande porte, foram registradas amplitudes maiores e a alteração do perfil aerodinâmico pode ter contribuído para o acréscimo das amplitudes de oscilação.

Segundo Battista e Pfeil (2010) as pressões de vento produzem forças resultantes periódicas horizontais e verticais. Como a estrutura da ponte apresenta elevada rigidez torsional, mesmo com a mudança de aplicação do ponto de aplicação da resultante, descarta-se a hipótese de vibração por torção. Desta forma, o modo de flexão vertical é dominante.

3 - EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES PARA FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS

Em se tratando de escoamentos incompressíveis e com viscosidade constante, o problema é regido pelas equações que são apresentadas adiante. Essas equações, da teoria de mecânica dos fluidos, são apresentadas em uma descrição Euleriana, onde as propriedades características do meio são consideradas funções do tempo e do espaço. O problema é definido em um domínio Ω com contorno Γ , contendo nde dimensões no espaço Euclidiano. Na forma não conservativa, isto é, utilizando variáveis primitivas de pressão e velocidade, em coordenadas cartesianas, e admitindo ainda a convenção de somatório: $a = 1, \dots, nde$ e $b = 1, \dots, nde$, as equações assumem a forma:

- Equação de conservação de quantidade de movimento:

$$\rho \frac{\partial u_a}{\partial t} + \rho u_b \frac{\partial u_a}{\partial x_b} - \frac{\partial \tau_{ab}}{\partial x_b} + \frac{\partial p}{\partial x_a} = f_a \quad (1)$$

- Equação de conservação de massa (equação de continuidade):

$$\frac{\rho u_a}{x_a} = 0 \quad (2)$$

no qual:

ρ é a massa específica do fluido;

$\tau_{ab} = \mu \left(\frac{\partial u_a}{\partial x_b} + \frac{u_b}{x_a} \right)$ é a tensão viscosa;

μ é a viscosidade dinâmica do fluido;

u_a são as componentes de velocidade;

p é a pressão;

f_a são as componentes das forças por unidade de volume no corpo.

O modelo é fechado introduzindo as condições de contorno e velocidades iniciais. As velocidades e tensões de superfície são conhecidas, respectivamente nos contornos Γ_{ua} e Γ_{ta} , tal que $\Gamma_{ua} \cup \Gamma_{ta} = \Gamma$ e $\Gamma_{ua} \cap \Gamma_{ta} = \emptyset$, ou seja:

$$u_a = \bar{u}_a(x, t) \quad x \in \Gamma_{ua} \quad (3)$$

$$\bar{t}_a(x, t) = (-p\delta_{ab} + \tau_{ab})n_b \quad x \in \Gamma_{ta} \quad (4)$$

em que δ_{ab} é o delta de Kronecker e n_b ($b = 1, n_{de}$) é o vetor normal externo ao contorno.

As condições de contorno de pressão e de fluxo de massa estão associadas ao balanço de massa. Estas grandezas são prescritas como \bar{p} e \bar{G} nos contornos Γ_p e Γ_G , respectivamente, tal que $\Gamma_p \cup \Gamma_G = \Gamma$ e $\Gamma_p \cap \Gamma_G = \emptyset$, ou seja:

$$p = \bar{p}(x, t) \quad x \in \Gamma_p \quad (5)$$

$$\rho u_b n_b = \bar{G}(x, t) \quad x \in \Gamma_G \quad (6)$$

O modelo contínuo é discretizado em elementos triangulares para representar velocidade e pressão. Nota-se que esta escolha de espaços de interpolação não é aceitável no contexto de formulações mistas, pois violam as condições de Babuska-Brezzi. No entanto, a formulação adotada contorna essas dificuldades (De Sampaio, 1991).

Tratando-se de problemas bidimensionais, da discretização das equações acima chega-se a um sistema linear simétrico de 3 equações e 3 incógnitas (pressão e velocidades no plano). O sistema é resolvido pelo método do gradiente conjugado mediante um procedimento de solução segregado, onde a pressão é a primeira a ser calculada.

4 - MÉTODO LES ASSOCIADO A UM PROCEDIMENTO ADAPTATIVO NO ESPAÇO E NO TEMPO

O objetivo deste método é simular explicitamente as grandes escalas de um fluxo turbulento enquanto faz a modelagem das pequenas escalas. As equações das grandes escalas de movimento são obtidas depois de feita a filtragem das equações de Navier-Stokes, já apresentadas. Contudo, a não-linearidade das equações de Navier-Stokes impossibilita a obtenção exata das equações das quantidades filtradas e um novo termo surge, devendo então ser modelado. Detalhes da operação de filtragem das equações de Navier-Stokes podem ser encontrados em (Hallak, 2002 e De Sampaio *et al.*, 2004).

Como resultado deste procedimento tem-se um parâmetro conhecido como tensor de Reynolds que retrata as interações entre as grandes escalas, possíveis de simular, e as escalas irresolvíveis ou sub-malha. Como não há expressões exatas para este termo, é necessário empregar modelos sub-malha para fazer a sua modelagem.

O modelo sub-malha empregado na modelagem consiste na associação da escolha do passo de tempo local com técnicas para remalhamento (remesh) introduzidos por De Sampaio (1993). Este algoritmo emprega passos de tempo locais baseados nas escalas de tempo de convecção e difusão dos processos resolvíveis na malha atual. Essas escalas de tempo são estimadas de acordo com valores locais de velocidade e propriedades físicas além da resolução local da malha. Esses passos de tempo são escolhidos de acordo com a expressão:

$$\Delta t = \alpha \frac{h_e}{\|\mathbf{u}^n\|} \quad (7)$$

$$\alpha(NRe) = \left[\coth\left(\frac{NRe}{2}\right) - \frac{2}{NRe} \right] \quad (8)$$

Nota-se que $NRe = \rho \|\mathbf{u}^n\| h_e / \mu$ representa o número de Reynolds local de cada elemento e é calculado de acordo com o módulo da velocidade local e o tamanho do elemento h_e .

Dentre as várias vantagens no uso desse passo de tempo local, tem-se que este é conveniente para acompanhar a evolução temporal dos processos de difusão e convecção resolvível em uma malha com tamanho local h_e . (De Sampaio, 1991). De fato, a equação (7), fornece para convecção pura $\Delta t = h_e / \|\mathbf{u}^n\|$ e para difusão pura $\Delta t = \rho h_e^2 / 6\mu$.

É importante notar que o passo de tempo dado pela equação (7) varia espacialmente de acordo com os valores locais de velocidade, propriedades físicas e geométricas da malha. Portanto, é necessário considerar a variação espacial do passo de tempo para o avanço do tempo computacional. Emprega-se um algoritmo que permite que cada grau de liberdade avance no tempo de acordo com seu próprio passo de tempo local. Os resultados são então interpolados periodicamente para um determinado tempo fixo. Detalhes sobre o algoritmo de passo de tempo local e suas interpolações podem ser obtidos nas referências De Sampaio (1993) e De Sampaio e Coutinho (1999).

O algoritmo de escolha do passo de tempo local é usado em conjunto com um esquema de remalhamento. Este permite a conexão entre os refinamentos no tempo e no espaço e, naturalmente, conduz a uma simulação simultânea e adaptativa no tempo e no espaço. De fato, quando o esquema de remalhamento cria refinamentos de malha locais para melhor resolver determinadas características locais do escoamento, a distribuição do passo de tempo é adaptada de acordo com essa resolução local.

A combinação da formulação estabilizada, o algoritmo do passo de tempo local e o esquema de remalhamento definem a metodologia aplicada neste trabalho definida como *simulação das largas escalas com modelo sub-malha implícito*.

5 - EXEMPLOS NUMÉRICOS

Os exemplos numéricos que serão apresentados neste trabalho referem-se exclusivamente ao escoamento em torno de perfis não aerodinâmicos. O estudo do comportamento desses perfis, assumindo escoamento incompressível e bidimensional, é relevante em muitas situações práticas de engenharia, pois algumas estruturas sujeitas à ação dinâmica do vento, tais como prédios, torres e pontes, possuem geometrias contendo ângulos retos.

Uma característica importante desses perfis, em particular das seções retangular e quadrada, é que, ao contrário das seções circulares, a separação (descolamento da camada limite) do escoamento ocorre em um ponto definido (vértices do elemento), independente do número de Reynolds (Re). Além disso, em seções retangulares alongadas ocorre o recolamento da camada limite, que afeta consideravelmente os coeficientes aerodinâmicos.

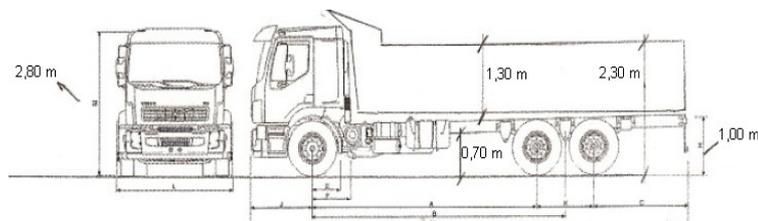
Para compreender os efeitos aerodinâmicos do vento em estruturas contendo cantos vivos e, em especial a ponte Rio-Niterói com o seu perfil alterado por veículos de grande porte foram feitas simulações utilizando as técnicas de fluidodinâmica computacional descritas anteriormente em alguns perfis especiais.

As simulações foram realizadas considerando-se os corpos fixos (caso aerodinâmico) e o escoamento turbulento ($Re=10^7$).

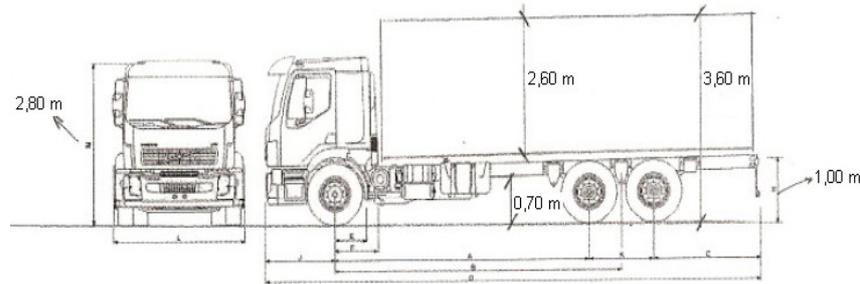
5.1 - Casos de Análise

No presente estudo busca-se obter uma resposta qualitativa de uma situação real da ponte sob a ação do vento e com o trânsito enfileirado dos veículos de grande porte.

Os veículos utilizados como parte constituinte da seção da ponte Rio-Niterói encontram-se ilustrados nas Figuras 5(a) e 5(b). O caminhão basculante da figura 5(a) tem altura de 1,3 m e largura de 2,5 m enquanto o caminhão baú da Figura 5(b) tem altura de 2,6 m e largura de 2,5 m.



(a) Dimensões do caminhão basculante



(b) Dimensões do caminhão baú

Figura 5: Veículos empregados na análise com respectivas dimensões.

Foram feitas as seguintes simulações:

- i. Perfis isolados da ponte e dos caminhões:
 - Ponte descarregada
 - Caminhão basculante isolado
 - Caminhão baú isolado
- ii. Perfis da ponte com os caminhões:
 - Ponte com caminhão basculante
 - Ponte com caminhão baú

As análises foram adimensionalizadas em termos das escalas de referência. As escalas de referência de comprimento são, respectivamente, as alturas dos perfis isolados. Para o conjunto da ponte com o caminhão a escala foi também a altura da ponte. Essas escalas são denominadas de D . A velocidade de referência do vento u_0 é a escala de referência de velocidade e ρu_0^2 é a escala de referência de pressão. O tempo é adimensionalizado em relação à D/u_0 .

As respostas em termos dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) ao longo do tempo de simulação foram obtidas por integração das pressões ao longo dos perímetros da ponte e do caminhão isoladamente.

5.2 - Resultados

a) Ponte descarregada

Os modelos analisados representam o trecho central de 180m da Figura 2 no qual a altura é constante e igual a 7,42m. O modelo bidimensional da ponte, para este trecho, cuja seção está representada na Figura 3, tem a malha inicial de 16448 elementos e 8502 nós.

Na Figura 6 tem-se o domínio analisado. Uma velocidade uniforme com componentes $u_1 = u_0$ e $u_2 = 0$ é prescrita na face AB. Os sub-índices 1 e 2 referem-se aos eixos horizontal e vertical, coincidentes com as direções x e y , respectivamente, do corpo. Nas faces AD e BC impõem-se a condição $u_2 = 0$ e na face CD prescrevem-se os valores de tensão de superfície livre na direção y e pressão nula. Na superfície impermeável do corpo obedece-se à condição de não deslizamento fazendo $u_1 = 0$ e $u_2 = 0$.

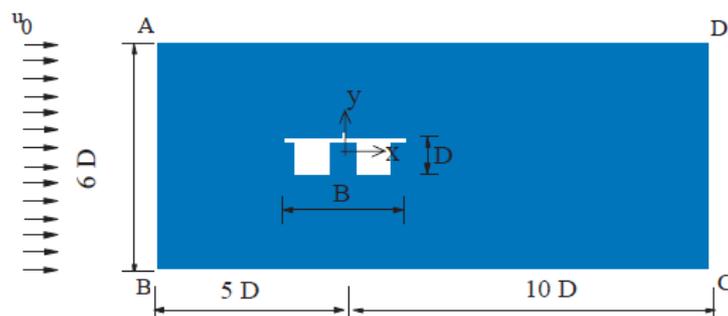
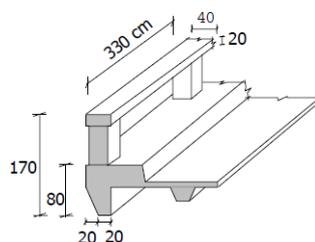


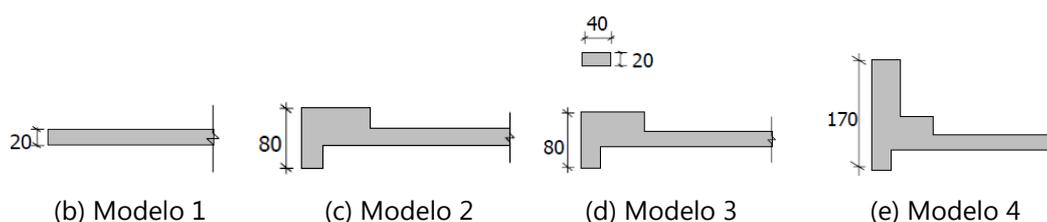
Figura 6: Domínio de análise da ponte.

Como a geometria de pequenos detalhes da seção transversal influencia as propriedades aerodinâmicas, as estruturas acessórias das medianas e guarda-corpos foram também consideradas. As medianas são elementos contínuos, de 85 cm de altura e 60 cm de largura enquanto os guarda-corpos são barreiras laterais compostos por uma viga horizontal apoiada a cada 3,30 m em pilares verticais. Na modelagem destes últimos elementos, cuja geometria está mostrada na Figura 7(a), houve a preocupação em escolher adequadamente o perfil bidimensional que melhor se aproximasse dos resultados reais.

Em Hallak (2002) quatro modelos com diferentes geometrias da barreira lateral foram testados. Estes estão ilustrados nas Figuras 7(b) a 7(e).



(a) Geometria da barreira (dimensões em cm)



(b) Modelo 1

(c) Modelo 2

(d) Modelo 3

(e) Modelo 4

Figura 7: Detalhes das barreiras e as diferentes geometrias testadas (dimensões em cm).

Na Tabela 1 são apresentados os resultados alcançados para cada um dos modelos analisados em termos das médias dos coeficientes C_D e C_L que são comparados aos valores experimentais obtidos de um ensaio em túnel de vento de modelo reduzido da ponte (Robinson e Savage, 1989). Nota-se que o modelo 3 foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais, sendo, portanto, adotado nas demais simulações.

A Tabela 1 apresenta também o número de Strouhal, St , que estabelece uma relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices f_v , uma dimensão D do corpo e a velocidade de vento u_0 .

$$St = \frac{f_v D}{u_0} \quad (9)$$

Na verdade o número de Strouhal refere-se à frequência predominante já que há uma faixa de frequências na qual surgem contribuições para as forças flutuantes especialmente para altos valores de Reynolds.

Modelos	St	\bar{C}_D	\bar{C}_L
Modelo 1	0,16	0,50	0,30
Modelo 2	0,16	0,53	0,35
Modelo 3	0,16	0,55	0,25
Modelo 4	0,16	0,65	0,03
Experimental (Robinson e Savage, 1989)	0,14	0,42	0,25

Tabela 1: Resultados numéricos e experimentais da ponte Rio-Niterói.

Na Figura 8 tem-se o espectro de frequência do coeficiente C_L da ponte. Nesta figura o pico na frequência adimensionalizada igual a 0,16 corresponde à frequência de oscilação observada, igual a 0,32 Hz, para velocidade de vento igual a $0,32 \times 7,42 / 0,16 = 14,8$ m/s = 53,4 km/h. Tem-se então $St = 0,16$. Na figura 9 visualizam-se os vórtices desprendidos dos cantos à barlavento. O escoamento apresenta tendência ao recolamento da camada limite na face superior da ponte e ao surgimento de vórtices em outros cantos vivos existentes no perfil, como os cantos a sotavento. Todavia, o escoamento é dominado pelo desprendimento de vórtices nos cantos da face de barlavento.

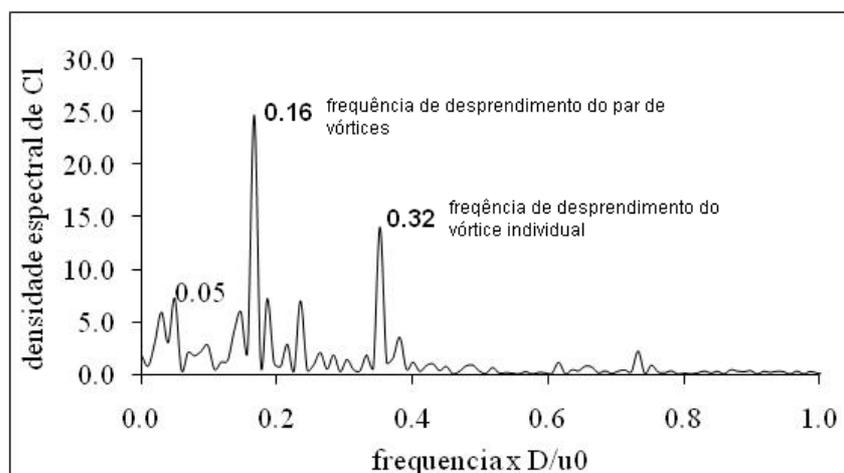


Figura 8: Espectro de frequência da ponte.

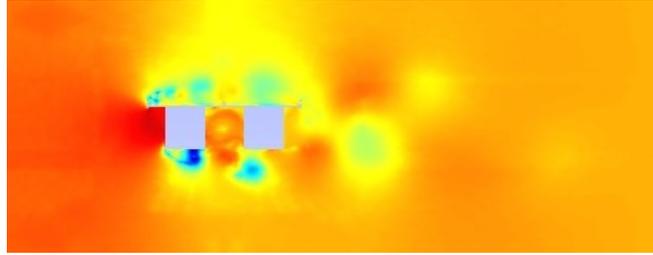
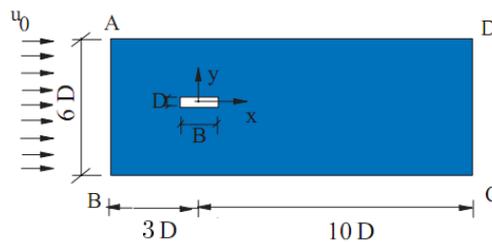


Figura 9: Campo de pressão para instante de tempo $t^* = 108$.

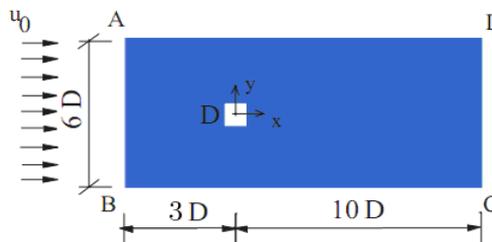
b) Caminhões isolados

Os domínios de análise empregados para o caminhão basculante e baú encontram-se ilustrados nas Figuras 10(a) e 10(b). As condições de contorno são as mesmas utilizadas para a ponte Rio-Niterói descarregada.

Nas Figuras 11(a) e 11(b) têm-se as malhas iniciais de cada simulação. A malha inicial para o caminhão basculante apresenta 3391 nós e 6514 elementos e para o caminhão baú 3395 nós e 6514 elementos.

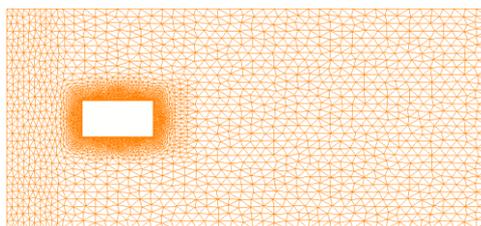


(a) caminhão basculante

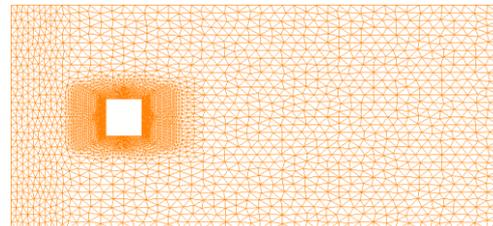


(b) caminhão baú

Figura 10: Domínios analisados.



(a) Caminhão basculante



(b) Caminhão baú

Figura 11: Malhas iniciais para os perfis dos caminhões.

Na Tabela 2 têm-se os resultados obtidos em termos dos coeficientes de força C_D , C_L , do número de Strouhal e da média quadrática das flutuações do coeficiente de sustentação. Estes resultados são apresentados para $Re = 10^5$, para fins de comparação com outros autores, e para $Re = 10^7$, que é o valor aproximado do problema real.

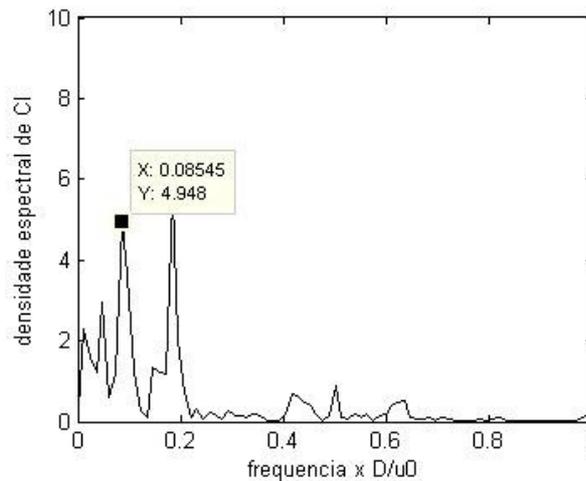
Casos	C_D	C_L	St	ΔC_{Lms}
Caminhão basculante isolado				
Presente simulação ($Re=10^7$)	1,72	-0,03	0,09	0,74
Sohankar(2008) ($Re=10^5$)	1,70	-	0,075	1,40
Caminhão baú isolado				
Presente simulação ($Re=10^7$)	2,14	-0,33	0,15	1,50
Presente simulação ($Re=10^5$)	2,10	-0,08	0,16	1,37
Experimental Vickery (1996)($Re=10^5$)	2,05	-	0,12	1,32
Sohankar(2008) ($Re=10^5$)	2,20	-	0,13	1,40

Tabela 2: Resultados em termos dos coeficientes de força e Strouhal para o caso do caminhão isolado.

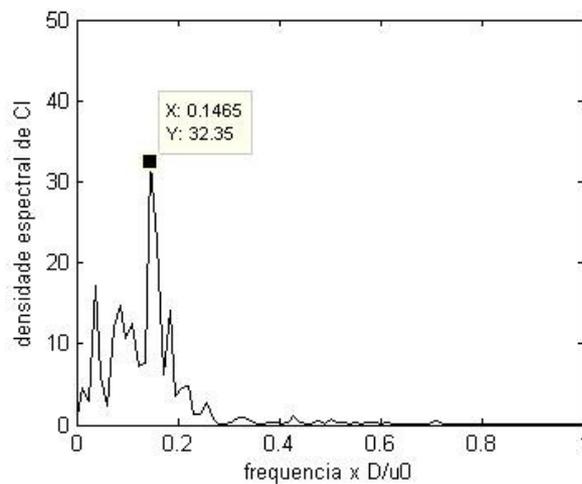
Observa-se na Tabela 2 que os valores do C_D estão de acordo com os valores obtidos por outros autores. Para obstáculos quadrados e retangulares e para os valores de Re analisados, este parâmetro é insensível a essa variação de Re , permanecendo com um valor aproximado para todos os autores. No caso do caminhão basculante isolado este valor ficou em 1,7. Para o caminhão baú, os valores também estiveram bastante próximos. Essa invariabilidade do valor do coeficiente de arrasto, mesmo com a variação de Re , está associada ao ponto fixo de descolamento do escoamento na superfície do corpo, característico em corpos retangulares (existência de vértices). Por outro lado, a média do coeficiente de sustentação permaneceu próxima a zero por simetria dos obstáculos e do escoamento.

Os valores de Strouhal também apresentaram pouca variabilidade dentre os casos apresentados em relação aos demais autores. Nota-se que a sua variação, para os limites geométricos analisados (relação altura/largura entre 0,52 e 1,04), é praticamente linear, como também observado por Sohankar(2008). O desvio padrão para o coeficiente de sustentação só apresentou discrepância no caso do caminhão basculante isolado.

Nas Figuras 12(a) e 12(b) têm-se o espectro das flutuações da força de sustentação para o valor de $Re=10^7$, mesmo utilizado nas simulações da ponte com o caminhão.



(a) Caminhão basculante isolado



(b) Caminhão baú isolado

Figura 12: Espectro das flutuações da força de sustentação para os corpos de altura unitária.

c) Ponte com os caminhões

O perfil da seção da ponte Rio-Niterói alterado pela presença de veículos pesados está ilustrado na Figura 13. Nesta, a altura do caminhão está generalizada por h . Para o caminhão basculante e baú as medidas de h são, respectivamente, 1,3 m e 2,6 m. O modelo de guarda-corpo é o modelo 3 empregado por Hallak (2002), em virtude da aproximação dos resultados em relação aos resultados experimentais.

Os domínios de análise para os dois casos e as condições de contorno são as mesmas utilizadas para os casos anteriores. As malhas iniciais para cada um dos casos estão ilustradas nas Figuras 14(a) e 14(b). A duas malhas iniciais apresentam 4695 nós e 8912 elementos.

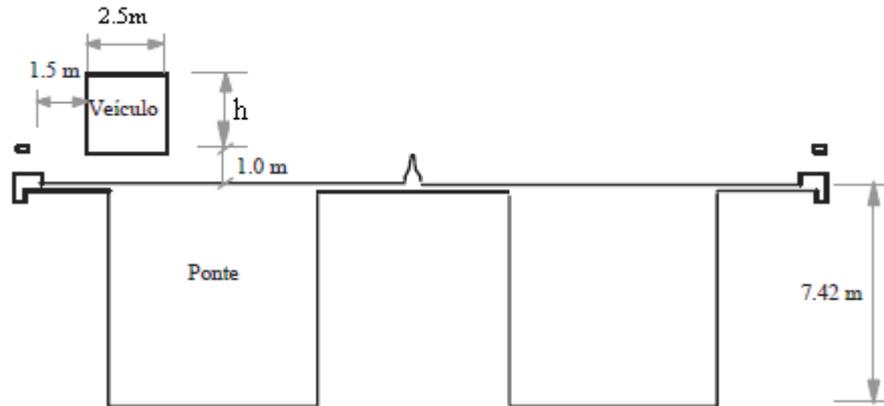
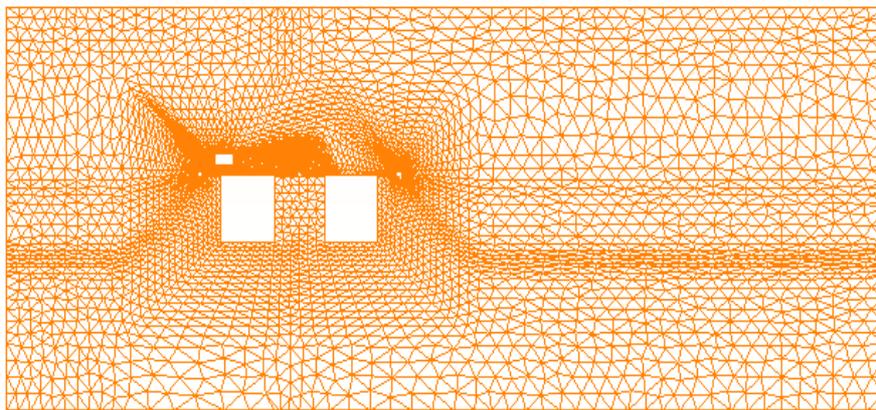
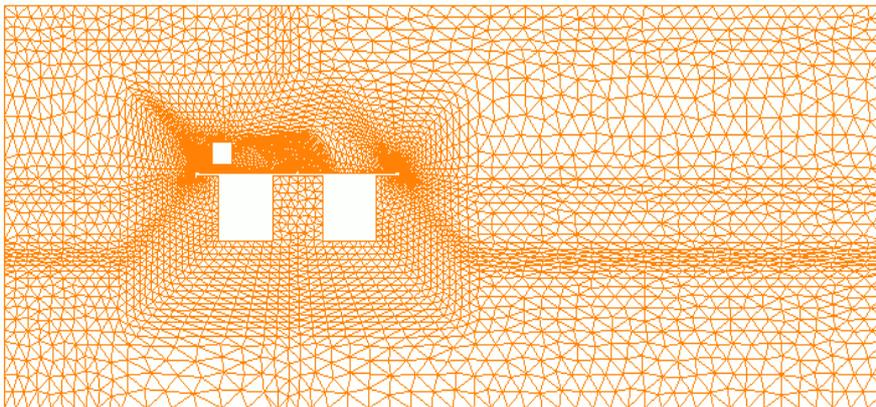


Figura 13: Perfil da seção transversal da ponte alterado pela presença de veículos de grande porte.



(a) Malha inicial da seção da ponte alterada pela presença do caminhão basculante.



(b) Malha inicial da seção da ponte alterada pela presença do caminhão baú.

Figura 14: Malhas iniciais para a seção da ponte alterada pela presença dos veículos de grande porte.

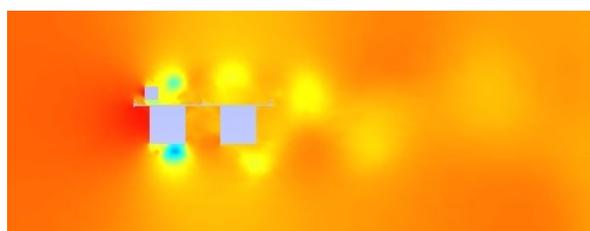
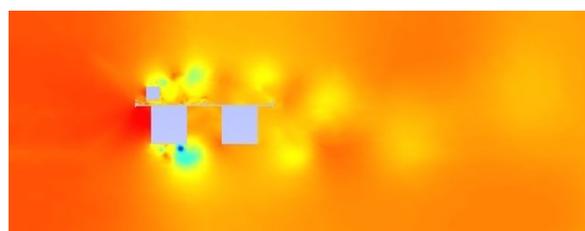
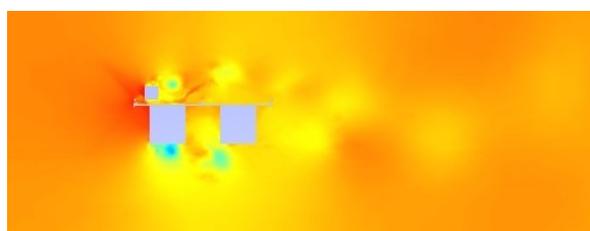
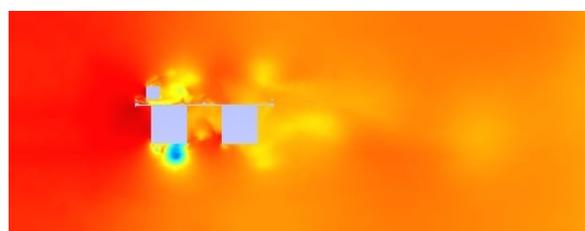
Os resultados que são apresentados a seguir são avaliados em termos de propriedades estatísticas dos coeficientes de arrasto e sustentação: valor médio (\bar{C}_D e \bar{C}_L), desvio padrão (ΔC_{Lms}), além do número de Strouhal. Na Tabela 3 têm-se os resultados obtidos para a ponte na presença dos veículos, comparados com os resultados para a ponte descarregada e $Re = 10^7$.

Casos	C_D	C_L	St	ΔC_{Lms}
Ponte descarregada	0,55	0,25	0,16	0,36
Ponte + caminhão basculante	0,59	0,21	0,15	0,44
Ponte + caminhão baú	0,91	-0,206	0,15	0,43

Tabela 3: Resultados da ponte.

Nota-se primeiramente que para a ponte as médias dos C_D s aumentam na presença dos veículos e a média dos C_L s diminuem e até mudam de sentido. Na realidade, ocorre um aumento da força resultante de até aproximadamente 55% em relação à ponte descarregada. O mais importante, contudo, é a observação de que a média das flutuações do C_L aumenta em até 22% com a ponte carregada enquanto o valor St permanece praticamente inalterado. Isso é um indicativo de que a ponte em vibração com o vento tenderá a oscilar com maiores amplitudes para uma mesma velocidade crítica de vento de aproximadamente 53,4 km/h.

Nas Figuras 15(a) a 15(h) tem-se a evolução do campo de pressões para o intervalo de tempo de $t^* = 115$ a $t^* = 122$ para a ponte com caminhão baú. Nestas pode-se observar a geração dos vórtices a barlavento do perfil, com descolamento ocorrendo na parte superior esquerda do caminhão e no canto inferior esquerdo da ponte. Nas Figuras 16(a) e 16(b) apresentam-se detalhes dos vórtices gerados na região entre o caminhão e a ponte, para os instantes $t^* = 119,5$ e $t^* = 125$. Nota-se a dominância de descolamento de vórtices do canto superior esquerdo do caminhão e as perturbações geradas no escoamento na região entre o caminhão e a ponte.

(a) Instante $t^* = 115$ (b) Instante $t^* = 116$ (c) Instante $t^* = 117$ (d) Instante $t^* = 118$

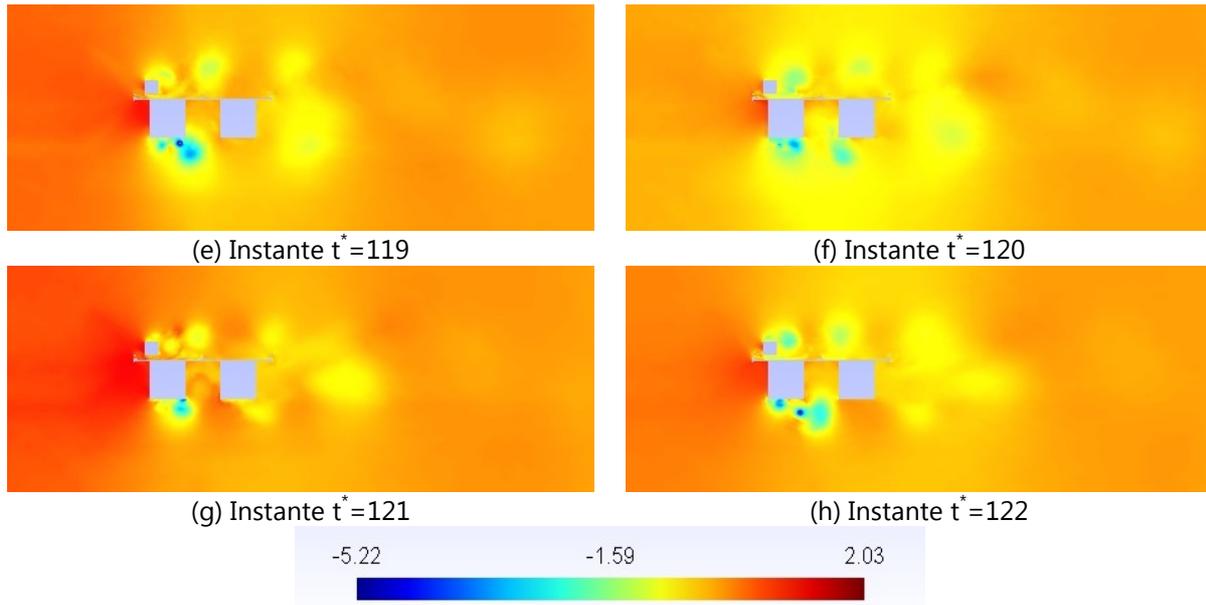


Figura 15: Campo de pressões do instante $t^* = 115$ a $t^* = 122$.

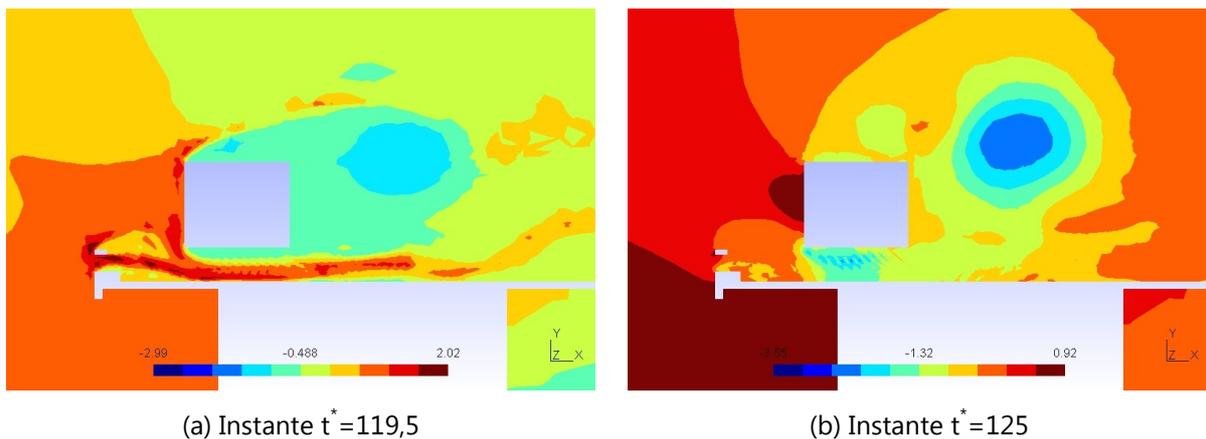


Figura 16: Detalhes das pressões próximas a região entre a ponte e o caminhão.

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo a obtenção dos coeficientes aerodinâmicos do vento na interação do mesmo com alguns elementos estruturais. O principal elemento envolvido na pesquisa é a seção da ponte Rio-Niterói, que tem seu perfil alterado pela presença de veículos de grande porte. Para fins de comparação foram estudados também alguns corpos isolados com a mesma geometria dos veículos empregados sobre a ponte.

A metodologia de trabalho utilizada compreende a combinação da formulação estabilizada, o algoritmo do passo de tempo local e o esquema de remalhamento que constituem o que é chamada de *simulação das largas escalas com modelo sub-malha implícito*.

Pelos resultados alcançados, pode-se reafirmar o potencial da fluidodinâmica computacional, visto que os valores obtidos estiveram de acordo com outros

resultados presentes na literatura e até mesmo os resultados experimentais, levando em conta que a pesquisa admitiu um modelo bidimensional, diferente dos experimentos, que considera as características tridimensionais.

A pesquisa demonstrou a influência da presença dos veículos de grande porte sobre a estrutura da ponte, que fazem com que as amplitudes de vibração, devido ao vento, aumentem para uma mesma velocidade de incidência.

REFERÊNCIAS:

- Battista, R.C., Pfeil, M.S., Control of wind oscillations of Rio-Niterói bridge. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 163: 87-96, 2010.
- Battista, R.C., Pfeil, M.S., Reduction of Vortex-Induced Oscillations of Rio-Niterói Bridge by Dynamic Control Devices. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84:273-288, 2000.
- De Sampaio, P.A.B., A Petrov-Galerkin Formulation for the Incompressible Navier-Stokes Equations using Equal Order Interpolation for Velocity and Pressure. *International Journal Numerical Methods. Engineering*, 31, 1135-1149, 1991.
- De Sampaio, P.A.B., Coutinho, A.L.G.A., Simulation of Free and Forced Convection Incompressible Flows using an Adaptive Parallel Vector Finite Element Procedure. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 29:289 – 309, 1999.
- De Sampaio, P.A.B., Hallak, P.H., Coutinho, A.L.G.A., Pfeil, M.S., A Stabilized Finit Element Procedure for Turbulent Fluid-Structure Interaction Using Adaptive Time-Space Refinement. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 44:673 – 693, 2004.
- De Sampaio, P.A.B., Transient Solutions of the incompressible Navier-Stokes equations in primitive variables employing optimal local time stepping. *Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods for Laminar and Turbulent Flow*, Swansea, U.K., 1493-1504, 1993.
- Hallak, P.H., *Parâmetros Aeroelásticos para Pontes Via Fluidodinâmica Computacional*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 158p, 2002.
- Robinson, R., Savage, M.G, Wind Tunnel Investigation of the President Costa e Silva Bridge, Rio de Janeiro, Brazil. Laboratory of Technical Report – LA – 311, National Aeronautical Establishment, National Research Council of Canada, Ottawa, 1989.
- Sohankar, A., Large eddy simulation of flow past rectangular-section cylinders: Side ratio effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96: 640–655, 2008.
- Vickery, B.J., Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a turbulent stream. *J. Fluid Mech*, 25: 481–494, 1996.