

Sobre a Modelagem Computacional de Estruturas Imersas em Escoamentos em Escala Subgrid

About Computational Modeling of Structures Submerged in Flows in Sub-Grid Scale

Eduardo González-Gorbeña e Paulo C. C. Rosman

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

eduardogg@oceanica.ufrj.br; pccrosman@ufrj.br

Recebido: 05/08/14 - Revisado: 16/10/15 - Aceito: 21/10/15

RESUMO

Na modelagem computacional de corpos de água naturais há situações nas quais estruturas verticais esbeltas como pilares de ponte fazem parte do domínio de modelagem. Neste trabalho avalia-se quatro técnicas para modelar a presença de pilares de pontes: Refinamento de Malha (RM), Ilha Nodal (IN), Termo de Tensão Adicional (TTA) e Aumento da Rugosidade do Fundo (ARF). Para cada uma delas são discutidas suas vantagens e desvantagens. Dentre as técnicas avaliadas, o método do Termo de Tensão Adicional (TTA) se mostrou o mais vantajoso por permitir reduzir o custo computacional, assim como alterar o valor do coeficiente de arrasto dependendo da geometria da estrutura. Quando comparados os resultados de perfis de velocidades longitudinais, observou-se que a técnica de TTA consegue assemelhar os valores da técnica de RM a partir de uma distância de 100 m a jusante dos pilares. Por esse motivo, concluiu-se que o método de TTA é apropriado para o estudo de processos distantes das estruturas, fora da esteira logo a jusante. O trabalho apresenta um estudo de sensibilidade do coeficiente de arrasto de pilares com seção circular que permite ao leitor ter uma noção da influência deste coeficiente.

Palavras Chave: Coeficiente de arrasto. Modelos hidrodinâmicos. Pilares de pontes. Termo de tensão adicional.

ABSTRACT

In the computational modeling of water environments there are cases where slender vertical structures, like bridge piers, are part of the modeling domain. In this work, four strategies for modeling the presence of bridge piers were studied: Mesh Refinement (MR), Nodal Island (NI), Additional Stress Term (AST) and Increasing Bottom Roughness (IBR). For each method, advantages and disadvantages were discussed. AST was the most favorable of the techniques studied due to the fact that it drastically decreases the time of computation, as well as providing the possibility to choose the drag coefficient according to the pier geometry and hydrodynamic condition. Comparing the results of longitudinal centerline velocity profiles, it has been observed that the AST method provides similar results to the RM method from a distance of 100 m downstream of the pier. For this reason, the research concludes that the AST method is appropriate to evaluate the flow distant from the structures, outside the near wake. This work presents a sensibility study of the pier drag coefficient to make the reader aware of the influence of this parameter.

Keywords: Hydrodynamic modeling. Bridge piers. Drag coefficient. Stress term.

INTRODUÇÃO

No estudo de corpos de água naturais através da modelagem computacional surgem situações nas quais determinadas estruturas fazem parte do domínio de modelagem. Um caso comum é quando uma ponte atravessa o corpo de água objeto de análise (ARUP, 2007; JACOBS; ARUP, 2009; TMGP, 2011; HRW, 2014). Nesses casos, os pilares da ponte devem ser considerados na modelagem para a análise hidrodinâmica. A inclusão dos efeitos dos pilares na modelagem computacional pode ser realizada através de diversas técnicas e modelos. Cada uma destas técnicas apresenta uma série de vantagens e desvantagens que devem ser consideradas na hora de estabelecer os objetivos procurados.

A modelagem hidrodinâmica pode ser realizada por meio de modelos unidimensionais (1D), bidimensionais (2DH) ou tridimensionais (3D). Quando a modelagem é realizada em corpos de água de grande escala com geometrias complexas, os modelos numéricos 1D não são apropriados devido às simplificações adotadas, que não permitem representar adequadamente as características do escoamento. Entretanto, os modelos 3D conseguem resolver a maiorias dos efeitos complexos resultantes da interação escoamento-estrutura, mas devido a seu alto custo computacional sua aplicação em grandes domínios de modelagem é inviável (VASQUEZ; WALSH, 2009). Para esses casos, os modelos 2DH com aproximação hidrostática se apresentam como a melhor opção, por resolver as componentes horizontais, médias na vertical, do campo de escoamento com um custo computacional aceitável. Em contrapartida, os modelos 2DH com aproximação hidrostática, ao não resolver as velocidades verticais, desprezam importantes processos localizados na vizinhança imediata das estruturas (CHANG et al., 2013).

OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho consiste em avaliar os efeitos de pilares de pontes na hidrodinâmica em cenários idealizados bidimensionais promediados na vertical (2DH), utilizando quatro métodos de modelagem diferentes:

1. Representação dos pilares da ponte geometricamente através da discretização detalhada da malha.
2. Representação dos pilares da ponte como ilhas nodais.
3. O efeito dos pilares é representado ao incluir um termo de tensão adicional nas equações de conservação de quantidade de movimento, desta forma origina-se uma perda de carga.
4. O efeito dos pilares é representado ao aumentar a rugosidade do fundo proporcionalmente à tensão adicional gerada pela presença dos pilares.

TÉCNICAS DE MODELAGEM

No presente item discutem-se cada uma das técnicas de modelagem a serem avaliadas. As quatro técnicas, a seguir descritas, são: Refinamento de Malha (RM), Ilha Nodal (IN), Termo de Tensão Adicional (TTA), e Aumento da Rugosidade

do Fundo (ARF).

Refinamento da Malha (RM)

A técnica de refinamento da malha consiste em discretizar o domínio de modelagem de modo que cada um dos pilares seja geometricamente representado, isto é, contornado pela malha de cálculo.

A principal vantagem desta técnica é que se aproxima mais da realidade física. Entretanto, a grande desvantagem é seu alto custo computacional devido ao reduzido tamanho dos elementos empregados na discretização espacial do domínio de cálculo. O que inviabiliza seu uso em domínios de modelagem de grande escala como baías ou estuários onde a área ocupada pela estrutura corresponde a uma pequena parte do domínio de modelagem total.

Ilhas Nodais (IN)

Nesta técnica, o nó ou os nós da malha de cálculo onde é posicionado cada um dos pilares da ponte representa um ponto de ilha nodal. Esta condição implica que a velocidade prescrita no nó, ou nós, é nula. A vantagem desta técnica é que permite uma discretização menos detalhada aumentando o desempenho computacional. Em contrapartida, o perfil de velocidade longitudinal e transversal obtido na região próxima aos pilares é menos realista. Isto é devido à interpolação do campo de velocidades entre os nós é afetada pela condição de ilha nodal. Além disso, a área de influência do nó também precisa ser adequada ao tamanho ocupado pelo pilar ou pilares posicionados nesse nó. Por último, esta técnica tem a grande limitação em domínios com discretização espacial de grande escala, pois os pilares ocupam a totalidade dos nós ao longo da seção que percorre a ponte criando uma barreira artificial para o escoamento.

Especificamente, costuma-se utilizar o método de IN para representar ilhas dispersas em grandes domínios de modelagem. Quanto menor seja o elemento ao qual o nó definido como IN esteja associado, menor será o efeito no campo de velocidades da região adjacente.

Termo de Tensão Adicional (TTA)

Este método consiste na inclusão de um termo de tensão adicional na equação de conservação de quantidade de movimento promediadas na vertical (2DH), Equação 1:

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \hat{u}_j \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho H} \left[\frac{1}{\partial x_i} \left(H \hat{\tau}_{ij} \right) + \tau_i^S + \tau_i^F + \tau_i^T \right] + \hat{a}_i; i = 1, 2 \quad (1)$$

onde: \hat{u}_i a velocidade do escoamento promediada na vertical (u e v representam as componentes horizontais da velocidade), ζ a elevação da superfície livre, ρ a massa específica da água, g é aceleração da gravidade, H a altura instantânea da coluna de água \hat{a}_i representa a aceleração de Coriolis. O termo 1* representa as tensões dinâmicas turbulentas, 2* representa as tensões do vento

na superfície livre, 3^* representa as tensões de atrito atuantes no fundo do escoamento e 4^* representa termos adicionais de tensão para quantificar o efeito de perda de carga associado à influência de estruturas que interatuam com o escoamento. Este termo de tensão é definido pela Equação 2:

$$\tau_i^T = \frac{1}{2} \rho C_T (\hat{u}^2 + \hat{v}^2)^{0,5} \hat{u}_i \cdot \Theta \quad (2)$$

C_T é o coeficiente de arrasto. Se A_i é a área de influência de cada nó computacional, A_T a área da estrutura exposta ao escoamento, e N_p o número de estruturas por nó, Equação 3:

$$\Theta = N_p \cdot (A_T / A_i) \quad (3)$$

representa a área total de estruturas por nó de cálculo, que se denomina fator de obstrução nodal.

As principais vantagens desta técnica é que permite que se tenha uma discretização menos detalhada na região de interesse, mas, diferentemente da técnica de ilha nodal, sem obstruir totalmente o fluxo do escoamento. Outra vantagem seria de se permitir controlar a tensão atribuída a cada nó, assim como relacionar o número de pilares em cada nó com a área de influência deste. Por outro lado, existe a dificuldade de definir, corretamente, o coeficiente de arrasto para cada tipo de estrutura em diferentes condições hidrodinâmicas.

Aumento da Rugosidade do Fundo (ARF)

A técnica habitual de modelagem da presença de estruturas se faz pelo o aumento do valor da rugosidade do fundo do nó ou nós de cálculo onde o objeto estrutural está posicionado. Inicialmente, esta parametrização compartilha as vantagens da técnica do TTA e, dependendo dos cenários de modelagem, deveria proporcionar resultados similares. As diferenças surgem quando o efeito da estrutura é modelado num cenário de simulação no qual existe uma variação da elevação da superfície livre. O motivo das discrepâncias é porque a tensão de atrito no fundo é inversamente proporcional à profundidade, ver Equação 4:

$$\tau_i^B = \frac{g}{C_h^2} \rho (\hat{u}^2 + \hat{v}^2)^{0,5} \hat{u}_i \quad (4)$$

onde C_h é o coeficiente de Chézy, definido como:

$$C_h = 18 \log_{10} \left(\frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (5)$$

sendo ε é a amplitude da rugosidade equivalente do fundo, que, entre outros fatores, depende de efeitos de correntes ou de correntes associadas com ondas. Desta forma, o valor da rugosidade deve ser tal que gere uma perda de carga equivalente aos efeitos conjuntos do cisalhamento no fundo mais a presença da estrutura. A Figura 1 mostra graficamente a discrepância entre os dois métodos de cálculo da tensão em função da elevação da coluna de água.

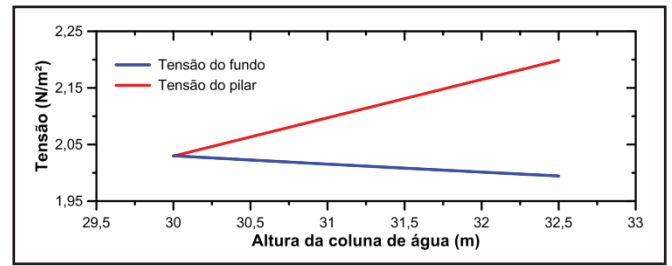


Figura 1 - Variação da tensão do fundo e a tensão de arrasto com a profundidade

METODOLOGIA

Para analisar as diferentes técnicas e sua aplicação em domínios com discretização espacial de grande escala foram realizadas simulações computacionais em vários cenários idealizados com canais retangulares. Seguem as características dos cenários idealizados:

1. Canal retangular de 9.600 m × 60 m com um pilar de diâmetro 2,2 m centralizado no canal.
2. Canal retangular de 9.600 m × 800 m com uma ilha nodal centralizada no canal.
3. Canal retangular de 9.600 m × 600 m com uma tensão adicional ou aumento da rugosidade do fundo, centralizada na seção transversal do canal na coordenada (4.800 m, 300 m), e representando o pilar com características similares às do cenário 1.

Nos cenários para o estudo das técnicas de IN, TTA e ARF a largura dos canais objetiva representar domínios com discretização espacial de grande escala.

O estudo foi realizado por meio do modelo hidrodinâmico promediado na vertical (2DH), que faz parte do SisBaHiA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. (www.sisbahia.coppe.ufrj.br). O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA[®] é um modelo 3D ou 2DH, otimizado para corpos de águas naturais com geometria complexa, que considera as aproximações hidrostática e de Boussinesq. Processos de calibração são minimizados devido a fatores como: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformação sigma, σ , que permite o mapeamento de corpos de água com contornos e batimetrias complexas, campos de vento e atrito junto ao fundo que variam no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES). Pode-se incluir efeitos de gradientes de densidade, acoplando-se, por exemplo, o transporte de sal e calor, dos Modelos de Qualidade de Água, aos Modelos Hidrodinâmicos. Pode-se também incluir a evolução morfológica do fundo, com o acoplamento de modelos de movimento de sedimentos. Na página do modelo, pode-se acessar exemplos de aplicações e a Referência Técnica do SisBaHiA[®] (ROSMAN, 2015), com informações detalhadas sobre as formulações matemática e numérica dos modelos.

Malhas de cálculo

A discretização dos domínios de cada um dos cenários de modelagem realizou-se via elementos finitos quadráticos triangulares no cenário 1 e retangulares nos cenários 2 e 3. A

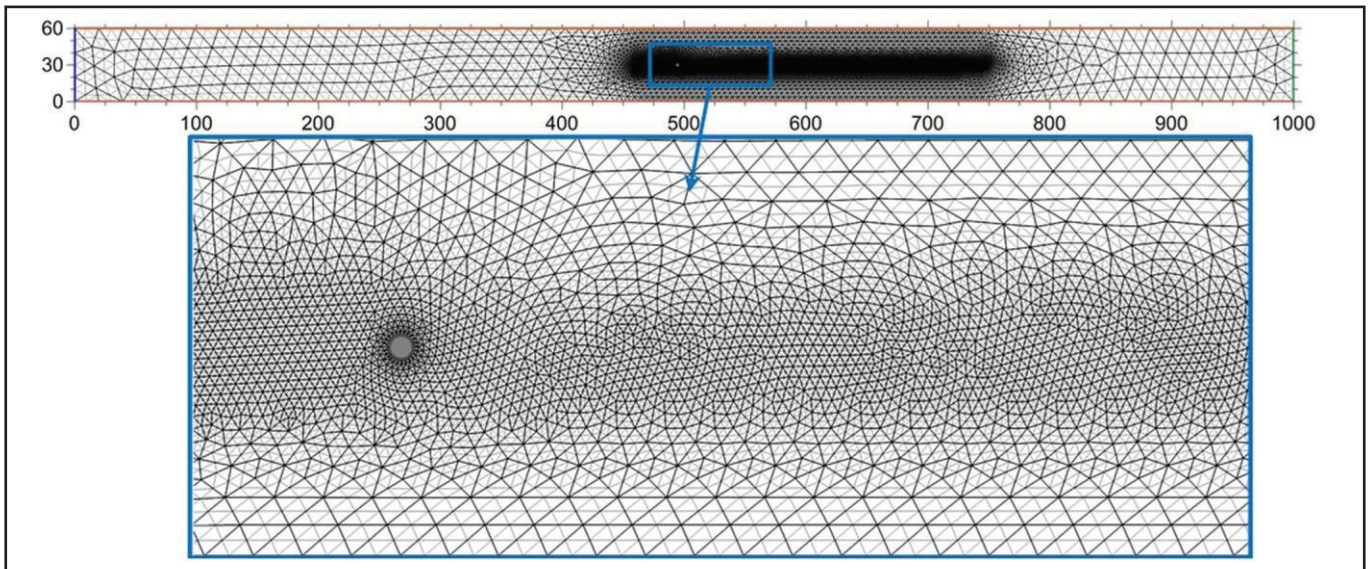


Figura 2 - Malha de cálculo utilizada na técnica de discretização detalhada dum pilar de 2,2 m de diâmetro

técnica de RM, conforme Figura 2, utiliza uma maior quantidade de elementos em comparação com as outras técnicas.

A discretização utilizada nos métodos de IN, TTA e ARF são similares, exceto pela largura de seus domínios de modelagem. A diferença na largura do domínio visa manter a simetria e evitar erros numéricos associados à localização da estrutura. Não se espera que a diferença de larguras entre ambos os cenários influencie nos resultados para o perfil de velocidades longitudinal. A discretização utilizada consiste em elementos finitos retangulares biquadráticos com espaçamento de $\Delta x = 200$ m e $\Delta y = 100$ m entre nós de cálculo. Devido à interpolação biquadrática utilizada no SisBaHiA[®], na técnica da IN recomenda-se posicionar a estrutura em um nó associado ao vértice de um elemento, a fim de evitar os possíveis erros numéricos. Enquanto que nas técnicas de TTA e ARF recomenda-se posicionar a estrutura no nó central do elemento. A Figura 3 e a Figura 4 ilustram as malhas de cálculo utilizadas nestes cenários.

As malhas exibidas na Figura 5 e na Figura 6 corres-

pondem às diferentes seções de canal com ponte com distintas soluções de apoio. As diferentes malhas são utilizadas no estudo de sensibilidade do coeficiente de arrasto, C_D , apresentado no item Calibração do coeficiente de arrasto.

Condições de contorno

Com o propósito de originar um escoamento unidirecional com sentido da esquerda à direita, prescreveu-se no contorno esquerdo (em azul na Figura 2 - Figura 6) uma fronteira terrestre com afluxo de vazão com velocidade de escoamento permanente e uniforme de 1 m/s. No contorno direito se impôs uma condição de fronteira aberta (em verde) para permitir o efluxo da vazão no domínio. No contorno terrestre, superior e inferior (marrom), se impôs uma condição de deslizamento. No método de discretização detalhada, na fronteira de terra correspondente ao pilar prescreveu-se uma condição de não deslizamento, isto é velocidade tangencial nula ($U_T = 0$).

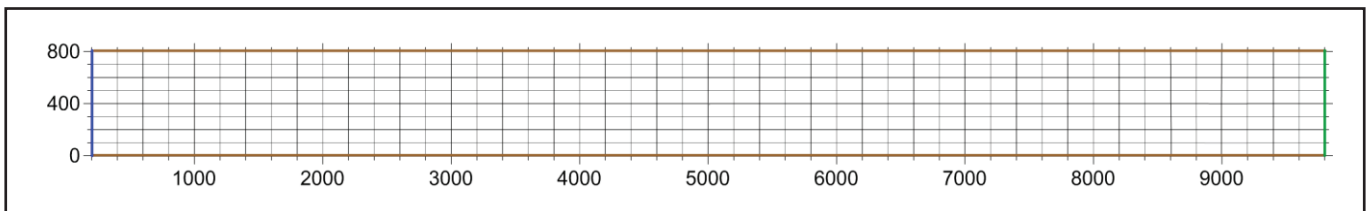


Figura 3 - Malha de cálculo utilizada na técnica da ilha nodal

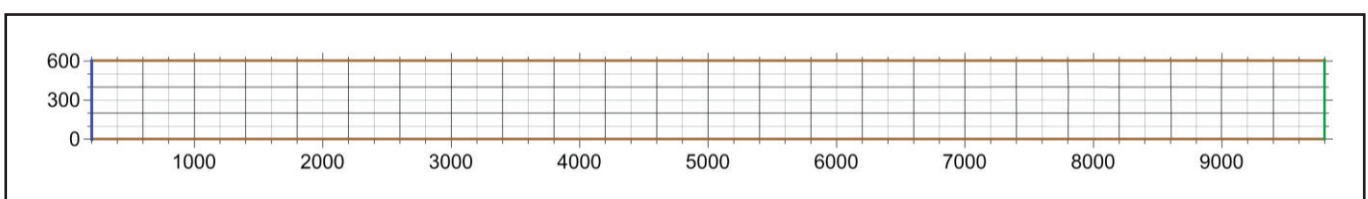


Figura 4 - Malha de cálculo utilizada na técnica do termo de tensão adicional

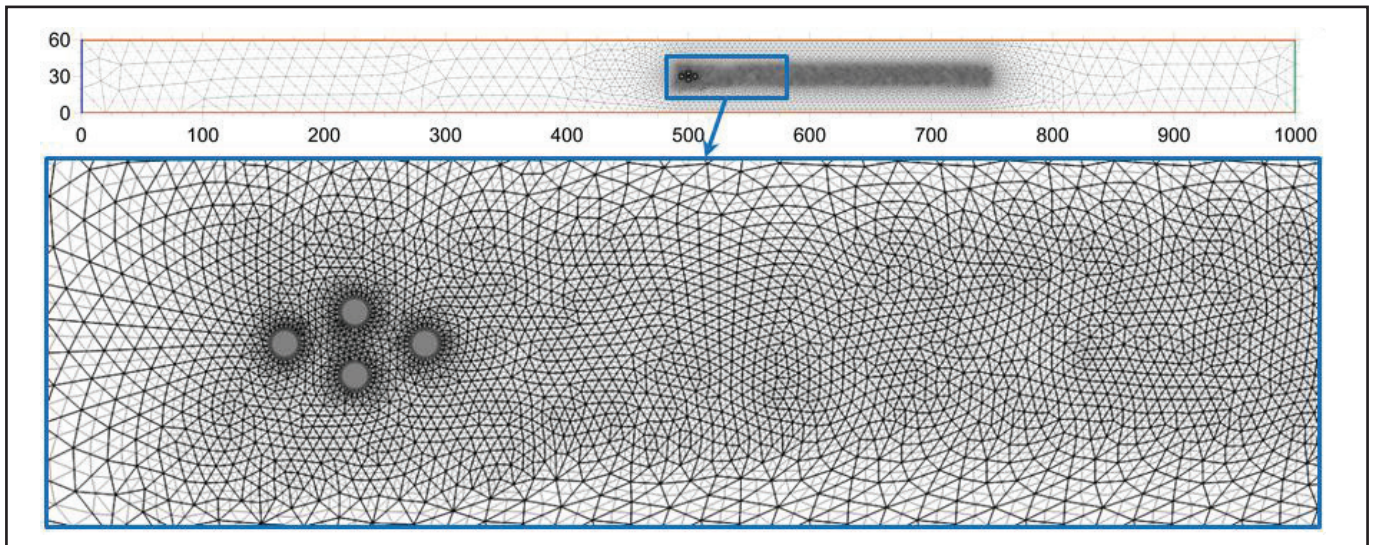


Figura 5 - Malha Seção 60 m, formada por 4 pilares de 2,2 m de diâmetro

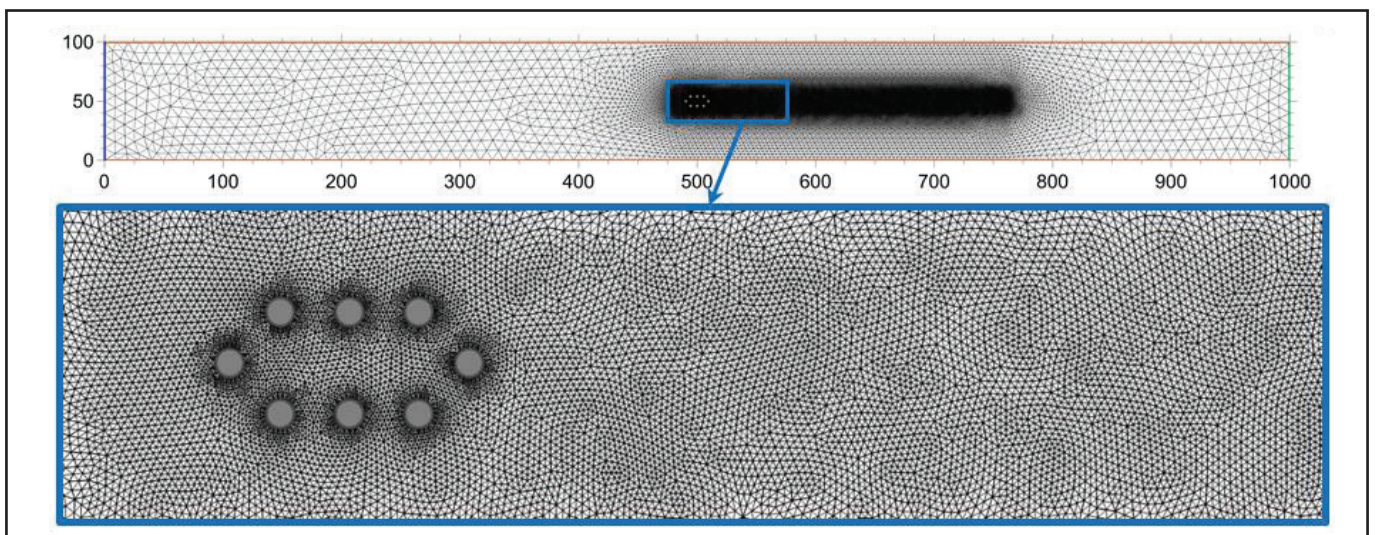


Figura 6 - Malha Seção 100 m, formada por 8 pilares de 2,2 m de diâmetro

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparação das técnicas de modelagem

Discute-se aqui as técnicas de modelagem de pilares, acima mencionadas, e analisa-se os resultados obtidos. As simulações computacionais foram realizadas com um computador pessoal com processador Intel® Core™ i5 CPU M 430 @ 2,27 GHz. O desempenho médio do cenário com 1 pilar foi de ~0,05 vezes o tempo real para a técnica de RM, de ~1.185 vezes o tempo real para a técnica de IN, e de ~1.650 vezes o tempo real para a técnica de TTA e ARF.

Os resultados de isolinhas de magnitude de velocidade para o cenário com 1 pilar são ilustrados da Figura 7 à Figura 10 para cada técnica adotada.

A Figura 7 representa a solução do campo de velocidades para o modelo detalhado que representa a geometria

exata do pilar. Este modelo proporciona a solução com maior grau de aproximação à realidade, porém, como mencionado anteriormente, é ainda inviável sua utilização em domínios de grande escala devido a seu alto custo computacional.

A Figura 8 representa a solução do campo de velocidades para a modelagem com o pilar da ponte como uma ilha nodal. Observa-se na figura que esta técnica gera excessiva perda de carga (regiões de baixa velocidade), tanto na direção longitudinal como transversal, quando comparada ao caso anterior.

A Figura 9 representa a solução do campo de velocidades para a modelagem que representa o pilar da ponte através de um termo adicional de tensão. O valor do coeficiente de arrasto de $C_D = 1,2$ foi determinado com base no valor recomendado para pilares circulares no Manual de Hidráulica do Departamento de Transporte do Texas – EUA e disponível online (MAREK, 2014). É notável que a perda de carga com $C_D = 1,2$ é muito

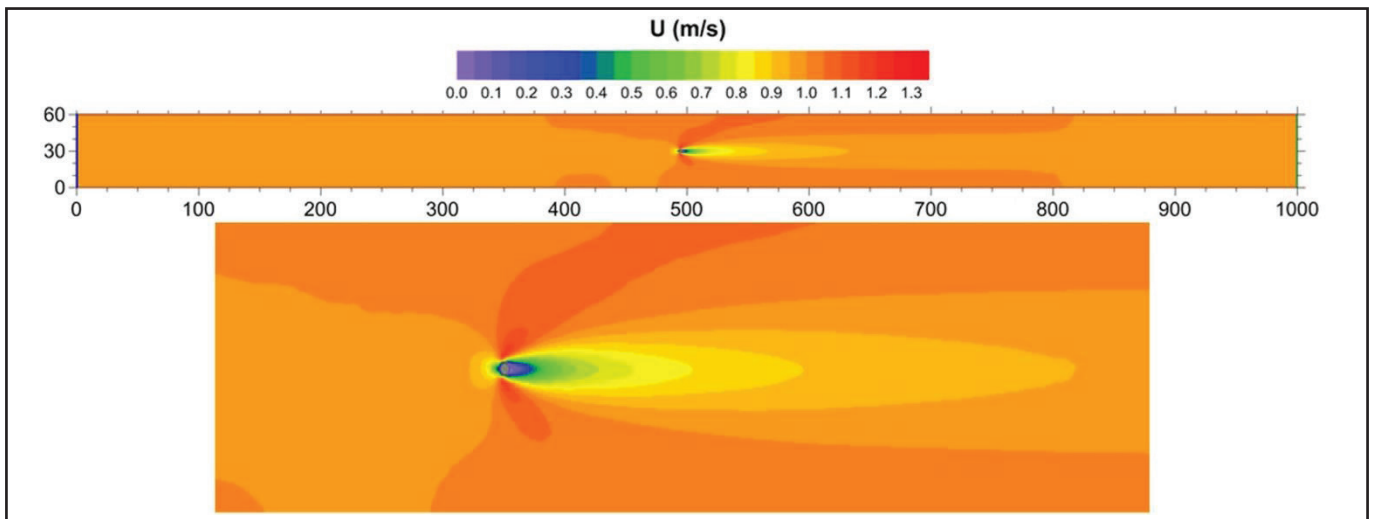


Figura 7 - Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem detalhada de um pilar da ponte. A falta de simetria das isolinhas decorre da assimetria da malha

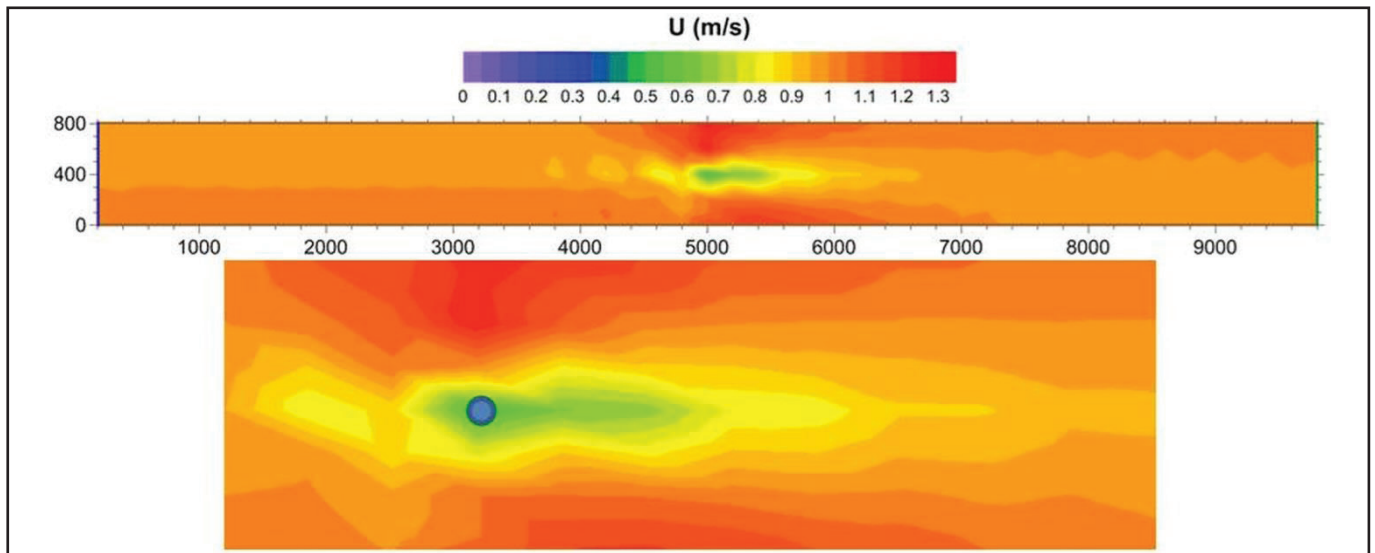


Figura 8 - Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem utilizando o método da Ilha-nodal

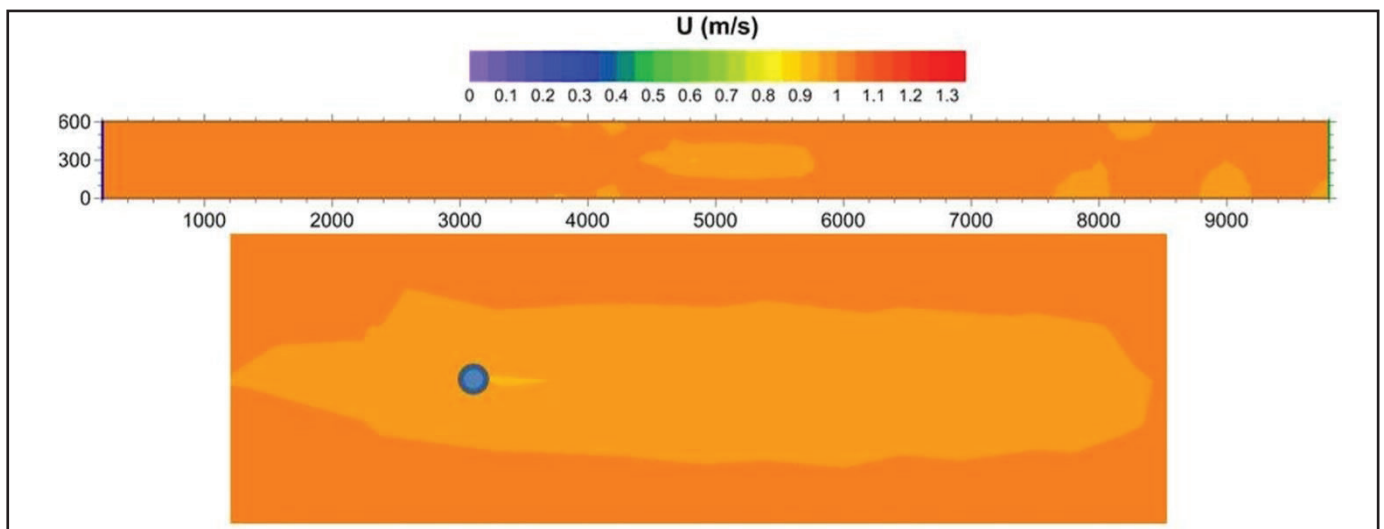


Figura 9 - Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem de 1 pilar da ponte por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto $C_D = 1,2$

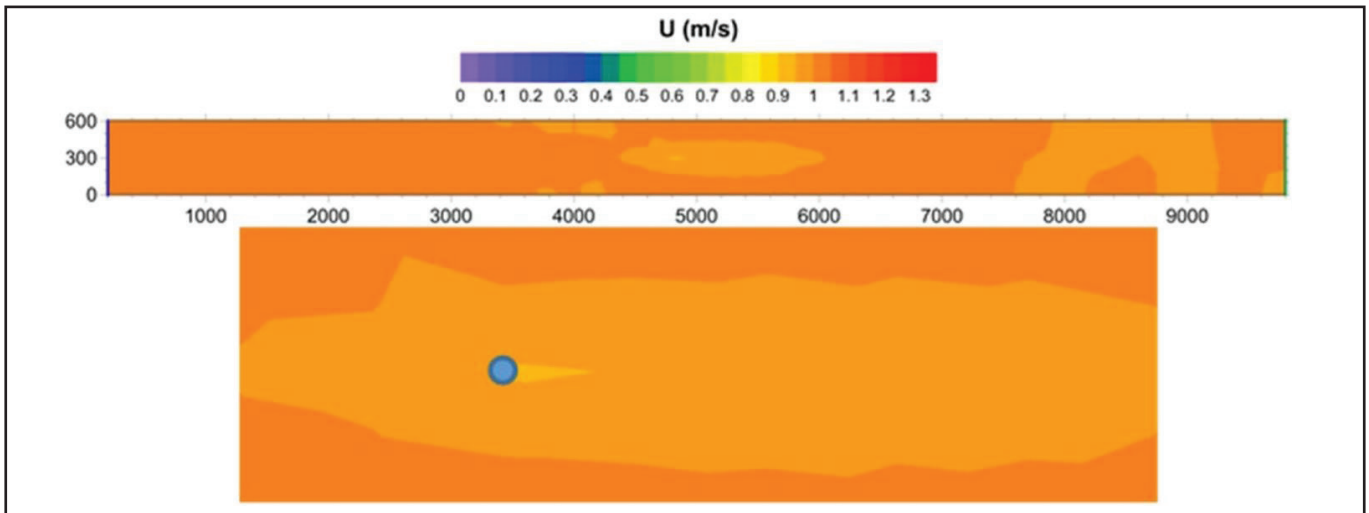


Figura 10 – Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem de 1 pilar da ponte por meio do aumento da rugosidade do fundo

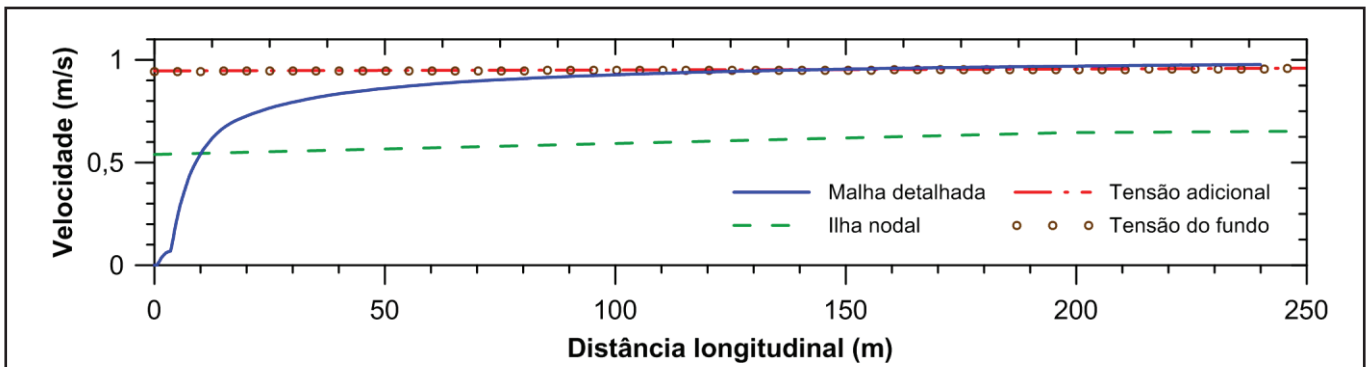


Figura 11 - Perfil de velocidades longitudinal a jusante do pilar para cada modelagem

menor que a perda gerada no caso anterior, pela técnica da ilha nodal. A maior vantagem da técnica do termo adicional de tensão é que possibilita controlar a magnitude da perda de carga e associar o efeito de múltiplas estruturas num só nó de cálculo. A principal desvantagem consiste na impossibilidade de definir a disposição das estruturas no nó, este último pode influenciar significativamente a recuperação da esteira.

Finalmente, a Figura 10 apresenta a solução do campo de velocidade quando utilizamos a técnica de ARF. O valor da rugosidade empregado foi calculado para gerar uma tensão equivalente ao gerado pelo TTA. Para esse propósito, igualaram-se as equações 2 e 4, e resolveu-se para ϵ . Neste caso, os resultados, praticamente, reproduzem os obtidos com o TTA.

A Figura 11 apresenta o perfil de velocidades longitudinal à jusante do pilar obtido em cada uma das modelagens. Adicionalmente, a Figura 12 ilustra o perfil de velocidades transversal a uma distância de 200 m a jusante dos quatro cenários modelados.

A partir da análise dos resultados acima apresentados pode-se concluir que a modelagem da presença de pilares de pontes em grandes domínios com a técnica de inclusão de um termo adicional de tensão se apresenta como a mais atrativa das três avaliadas visto que: 1) proporcionar resultados próximos à modelagem detalhada, 2) tem um desempenho computacional factível, 3) permite incluir vários pilares em um único nó, assim como 4) alterar o valor do coeficiente de arrasto utilizado, e

5) a tensão obtida é proporcional à altura da coluna de água e não inversamente proporcional como no caso da ARF. Essas vantagens se mantem mesmo que as características do cenário de modelagem mudem (i.e., condição hidrodinâmica, batimetria, geometria do canal e do pilar, número e disposição dos pilares), sempre que seja uma modelagem com discretização espacial de grande escala.

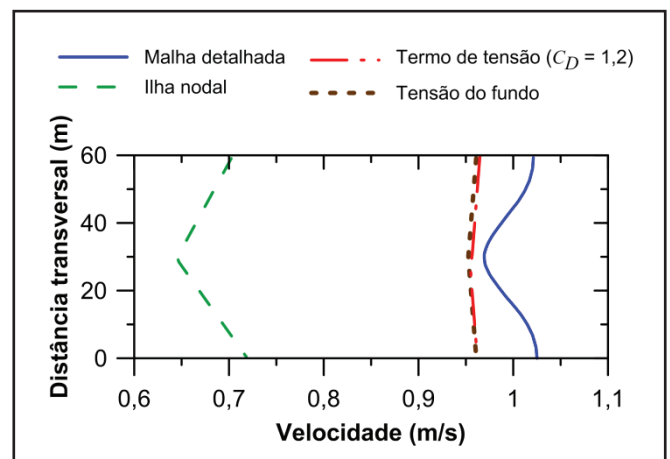


Figura 12 - Perfil de velocidades transversal a 200 m jusante do pilar para cada modelagem

Calibração do coeficiente de arrasto

Uma vez escolhida a técnica do TTA como a mais apropriada para a modelagem de pilares de pontes, é necessário definir qual deve ser o valor do coeficiente de arrasto que gere a perda de carga desejada. O coeficiente de arrasto de uma determinada estrutura é função, principalmente, de: forma da estrutura, rugosidade da superfície da estrutura, turbulência, velocidade e características físicas (i.e., viscosidade) do escoamento incidente.

Nas experiências realizadas por Charbeneau e Holley (2001) com 1 pilar, de seção circular, sob diferentes números de Froude e Reynolds, o valor máximo e mínimo do coeficiente de arrasto obtido é de $C_D = 1,28$ e $C_D = 0,6$, respectivamente. Entretanto, o máximo valor do coeficiente de arrasto, apresentado em Marek (2014) independentemente do número de Reynolds da estrutura, R_e , é de $C_D = 2$ para pilares com seção retangular. No *Coastal Engineering Manual* (USACE, 2012) propõe-se a Equação para determinar o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds.

$$C_D = \begin{cases} 1,2 - \frac{R_e - 2 \cdot 10^5}{6 \cdot 10^5} & \rightarrow 2 \cdot 10^5 < R_e < 5 \cdot 10^5 \\ 0,7 & \rightarrow R_e > 5 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (6)$$

Onde R_e é definido pela Equação :

$$R_e = \frac{u_m D}{\nu} \quad (7)$$

u_m é a velocidade do escoamento média na vertical, D é o diâmetro do pilar e ν a viscosidade cinemática do escoamento.

Cabe destacar que para as condições hidrodinâmicas simuladas ($H = 30$ m, $U = 1$ m/s), com a Equação 6 obtém-se um valor de $C_D = 0,7$.

Desta forma, com o intuito de apresentar o limite superior e inferior do efeito do coeficiente de arrasto na hidrodinâmica foram realizadas duas novas simulações com o método de TTA, mas dessa vez com $C_D = 2$ e $C_D = 0,6$. Os resultados obtidos, ver Figura 13 e Figura 14, são comparados com o cenário de modelagem com malha detalhada e com o cenário para $C_D = 1,2$. A análise dos resultados é realizada para duas regiões da esteira: a região imediatamente a jusante do pilar até uma distância de 50 m, que denominaremos como campo próximo da esteira, e a região a jusante além desse ponto, que denominaremos como campo afastado da esteira. Na região do campo próximo da esteira os resultados diferem significativamente entre as duas técnicas. Já no campo afastado da esteira, os resultados dos dois métodos têm comportamentos similares, mostrando uma tendência linear de igual inclinação. As diferenças obtidas entre os resultados dos cenários com mesmo método de modelagem são inferiores a 7%. Contudo, os resultados no campo afastado da esteira entre os dois métodos, RM e TTA, diferem em até 5%. A Tabela 1 resume as diferenças encontradas em várias distâncias e para cada coeficiente de arrasto entre o método de RM e TTA.

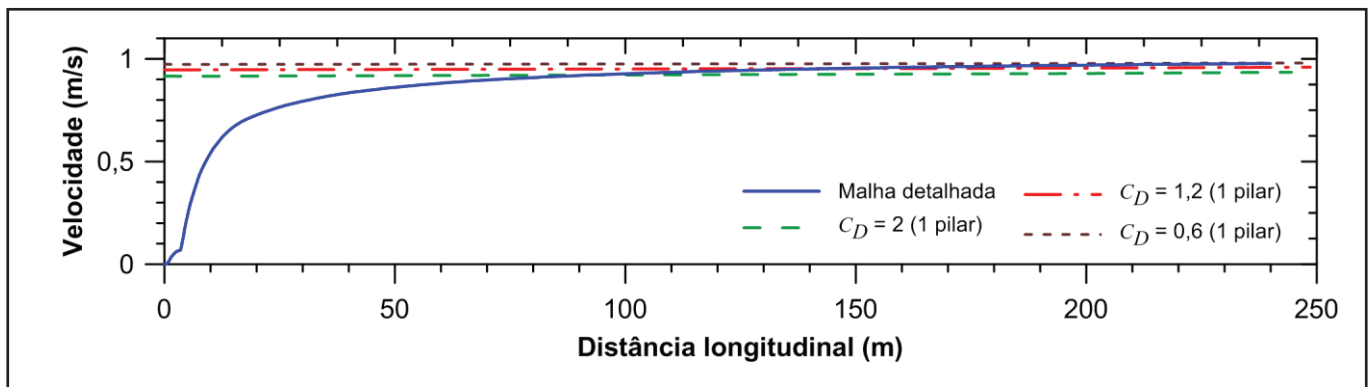


Figura 13 - Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com $C_D = 2$, $C_D = 1,2$ e $C_D = 0,6$; apoio de 1 pilar

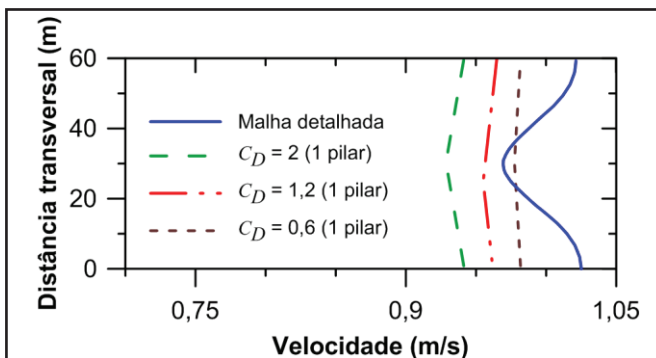


Figura 14 - Perfil de velocidades transversal a 200 m jusante do pilar para cada cenário de modelagem

Tabela 1 - Porcentagem de diferença na velocidade a diferentes distâncias obtidas entre o método RM e TTA para o cenário com 1 pilar

Método	Porcentagem de diferença da velocidade [%]				
	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m
RM [m/s]	0,86	0,93	0,96	0,97	0,98
$C_D = 0,6$	13,1	5,2	2,2	0,8	0,0
$C_D = 1,2$	10,1	2,5	-0,2	-1,5	-2,0
$C_D = 2,0$	6,6	-0,6	-3,1	-4,2	-4,5

O método do TTA consegue representar adequadamente a magnitude da velocidade a uma distância aproximada de uns 100 m do pilar.

A título de comparação, a Tabela 2 e a Tabela 3 exibem os resultados obtidos através dos métodos de malha detalhada e termo de tensão adicional, com $C_D = 2$, $C_D = 1,2$ e $C_D = 0,6$, para os apoios representativos de duas seções com ponte como objeto de estudo. As seções modeladas são:

- a) Seção de 60m formada por 4 pilares com diâmetro 2,2 m e dispostos como ilustrado na Figura 5.
- b) Seção de 100m formada por 8 pilares com diâmetro 2,2 m e dispostos como ilustrados na Figura 6.

Em cada um dos cenários modelados com o TTA, Figura 15 à Figura 22, é notável uma subestimação da magnitude de velocidade no campo afastado da esteira. Essa diferença pode ser associada à impossibilidade da técnica representar a disposição em planta dos pilares, fator que influencia a recuperação da esteira.

Tabela 2 - Porcentagem de diferença na velocidade a diferentes distâncias obtidas entre o método RM e TTA para o cenário da Seção de 60 m (4 pilares)

Método	Porcentagem de diferença da velocidade [%]				
	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m
RM [m/s]	0,66	0,84	0,90	0,93	0,96
$C_D = 0,6$	36,6	8,7	1,5	-1,8	-3,3
$C_D = 1,2$	26,1	0,8	-5,5	-8,2	-8,9
$C_D = 2,0$	16,0	-6,8	-12,2	-14,3	-14,3

Tabela 3 - Porcentagem de diferença na velocidade a diferentes distâncias obtidas entre o método RM e TTA para o cenário da Seção de 100 m (8 pilares)

Método	Porcentagem de diferença da velocidade [%]				
	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m
RM [m/s]	0,37	0,64	0,75	0,82	0,88
$C_D = 0,6$	126,0	32,5	12,9	4,2	-0,5
$C_D = 1,2$	100,4	18,4	1,5	-5,7	-8,9
$C_D = 2,0$	78,2	6,1	-8,2	-14,1	-15,9

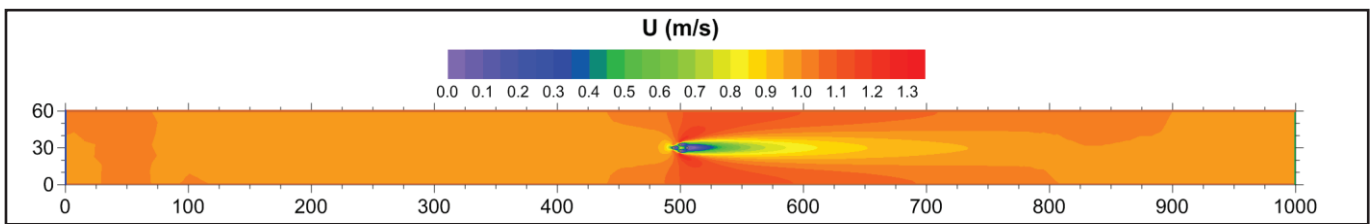


Figura 15 - Isolinhhas de velocidade obtidas com a modelagem detalhada de um apoio de 4 pilares (Seção 60 m)

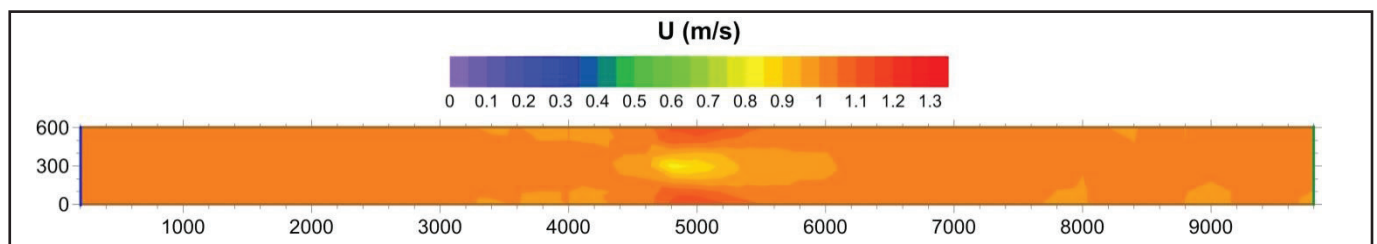


Figura 16 - Isolinhhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto $C_D = 1,2$ de um apoio de 4 pilares (Seção 60 m)

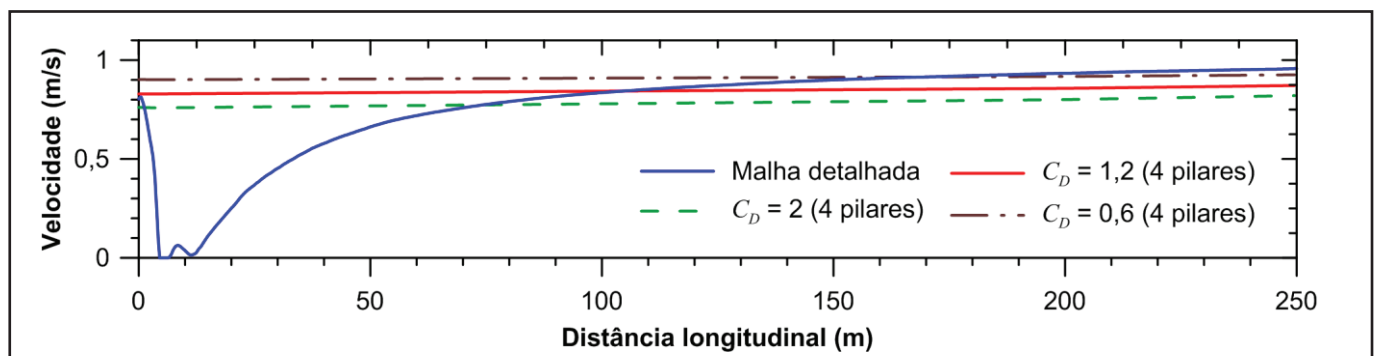


Figura 17 - Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com $C_D = 2$, $C_D = 1,2$ e $C_D = 0,6$; apoio de 4 pilares (Seção 60 m)

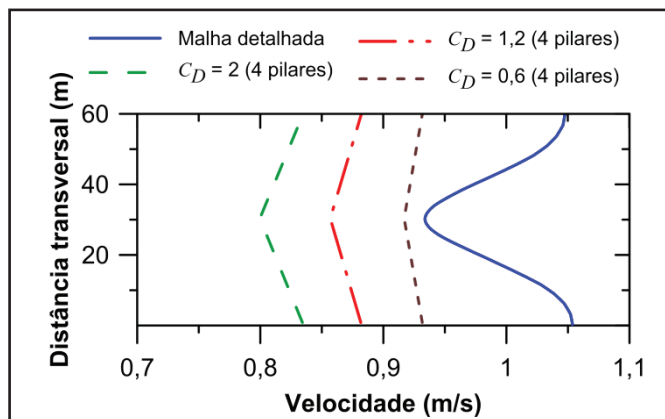


Figura 18 - Perfis de velocidades transversais a 200 m jusante de um apoio de 4 pilares (Seção 60 m) para cada cenário de modelagem

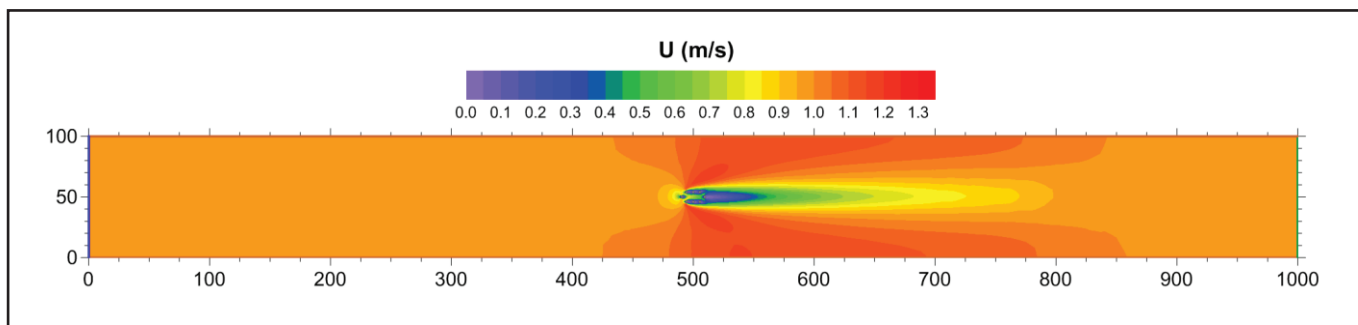


Figura 19 - Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem detalhada de um apoio de 8 pilares (Seção 100 m)

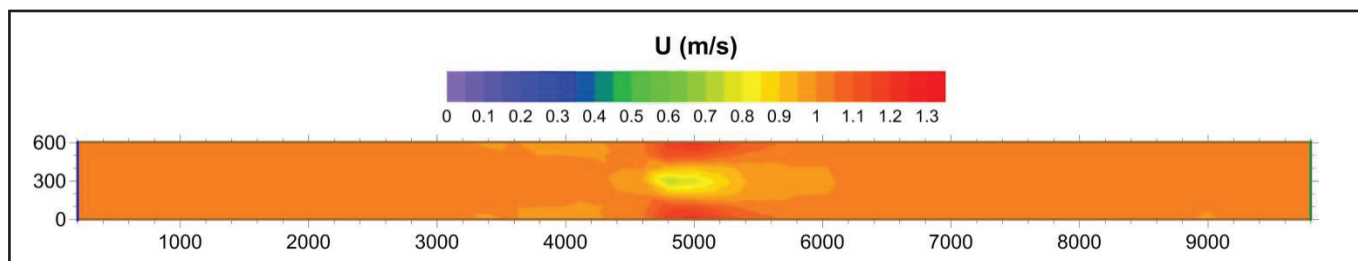


Figura 20 - Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto $C_D = 1,2$ de um apoio de 4 pilares (Seção 100 m)

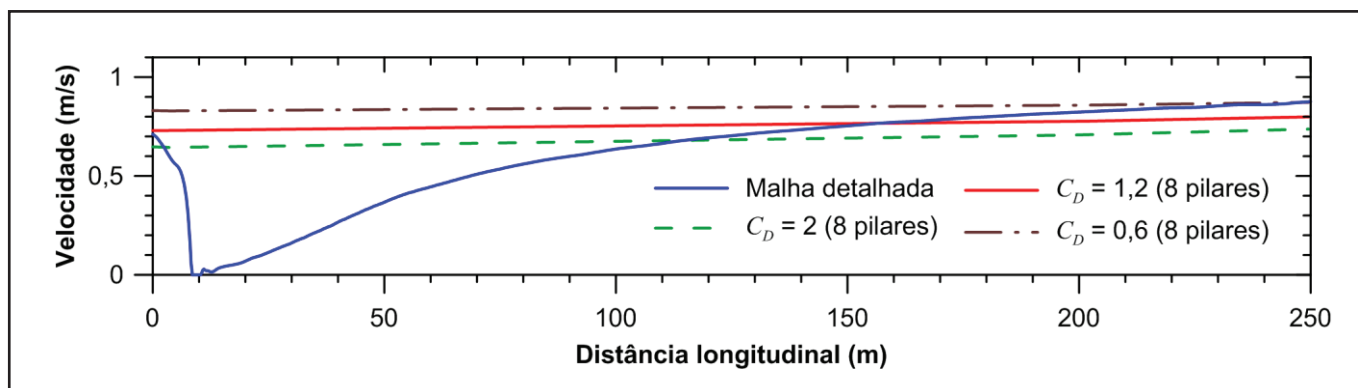


Figura 21 - Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com $C_D = 2$, $C_D = 1,2$ e $C_D = 0,6$; apoio de 8 pilares (Seção 100 m)

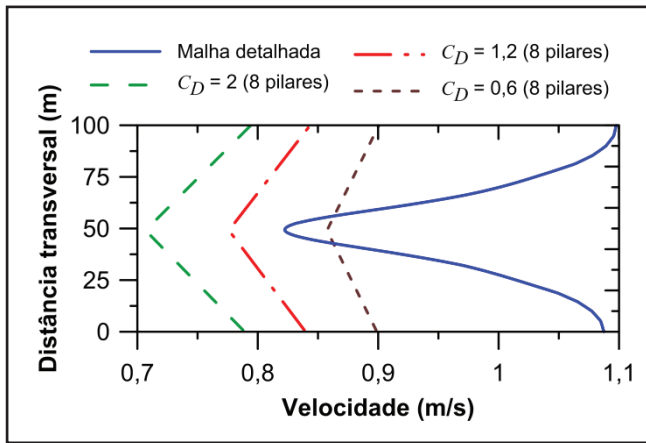


Figura 22 - Perfis de velocidades transversais a 200 m jusante de um apoio de 8 pilares (Seção 100 m) para cada cenário de modelagem

Influência da disposição dos pilares

Com o objetivo de estudar o efeito da disposição dos pilares no campo de velocidades foram realizadas novas simulações. As simulações adotaram a estratégia seguida em Arup (2007), na qual em vez de considerar o número total de pilares localizados em cada nó, só foram considerados os pilares que de fato obstruem a seção transversal incidente ao escoamento. Na representação das seções de 60 m (4 pilares) e 100 m (8 pilares) seriam consideradas 3 pilares para cada um dos casos. A Figura 23 ilustra o procedimento adotado onde em verde aparecem os pilares que foram considerados em cada caso. A Figura 24 e a Figura 25, e a Tabela 4 e a Tabela 5 resumam os resultados obtidos com esta estratégia.

Tabela 4 - Porcentagem de diferença na velocidade a diferentes distâncias obtidas entre o método RM e TTA para o cenário da Seção de 60 m (3 pilares)

Método	Porcentagem de diferença da velocidade [%]				
	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m
RM [m/s]	0,66	0,84	0,90	0,93	0,96
$C_D = 0,6$	40,4	11,3	3,4	-0,7	-1,8
$C_D = 1,2$	31,3	5,3	-2,2	-4,7	-1,8
$C_D = 2,0$	22,3	-1,9	-7,7	-11,1	-11,2

Tabela 5 - Porcentagem de diferença na velocidade a diferentes distâncias obtidas entre o método RM e TTA para o cenário da Seção de 100 m (3 pilares)

Método	Porcentagem de diferença da velocidade [%]				
	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m
RM [m/s]	0,37	0,64	0,75	0,82	0,88
$C_D = 0,6$	151,5	46,2	23,4	14,2	7,3
$C_D = 1,2$	135,3	38,3	16,8	8,1	7,3
$C_D = 2,0$	119,0	28,9	10,1	0,8	-3,0

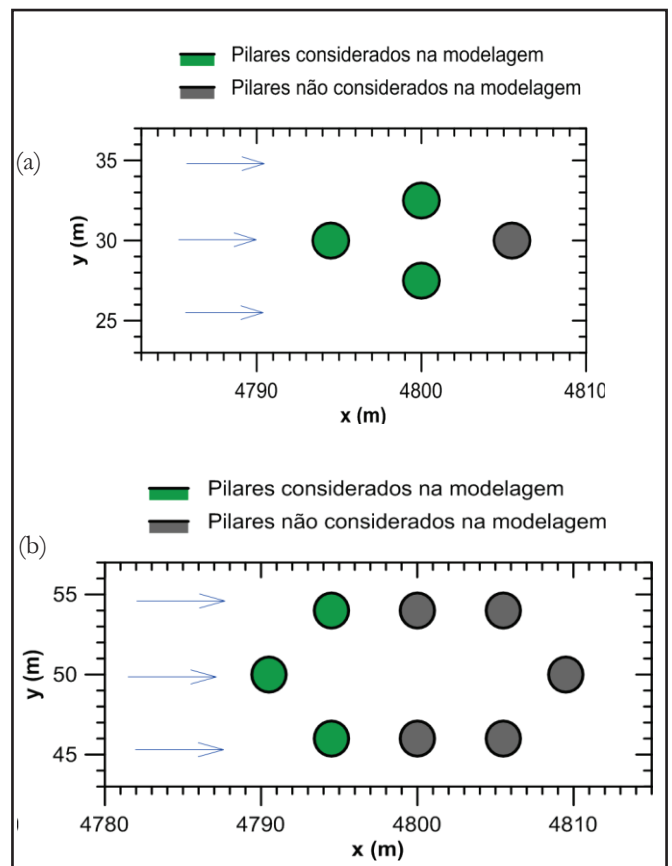


Figura 23 - Definição dos pilares considerados na modelagem (em verde para) e apoio com 4 pilares (a) e 8 pilares (b). As setas indicam a direção do escoamento

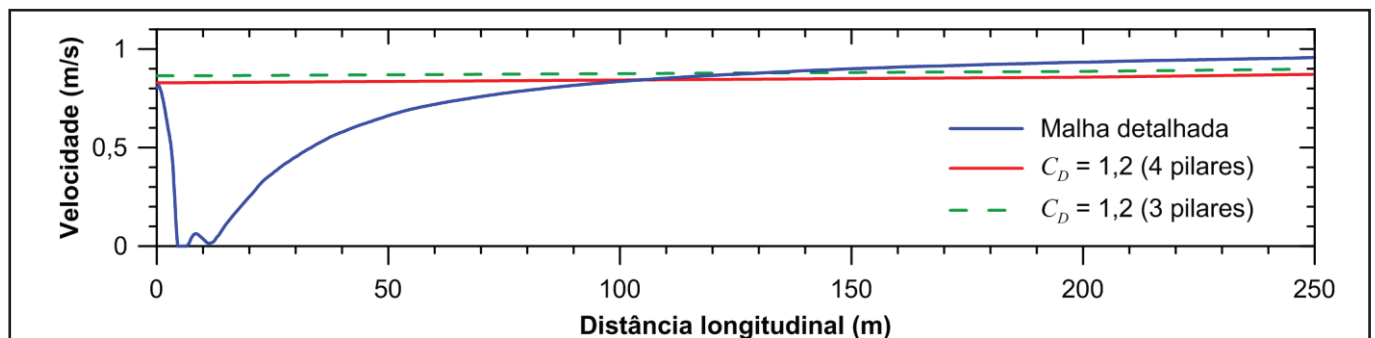


Figura 24 - Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com $C_D = 1,2$ com apoios de 4 e 3 pilares (Seção 60 m)

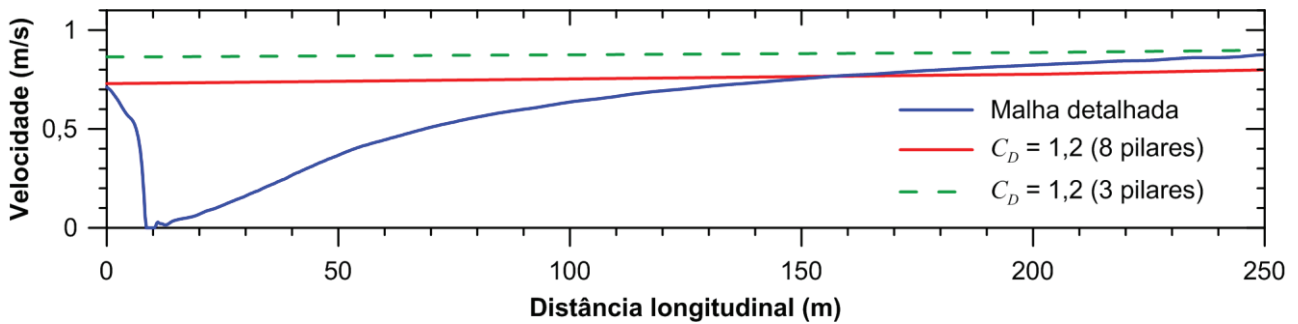


Figura 25 - Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com $C_D = 1,2$ com apoios de 8 e 3 pilares (Seção 100 m)

A principal desvantagem desta estratégia, especialmente para apoios com um número elevado de pilares, é que não leva em conta a presença dos outros pilares que formam o apoio, o que resulta numa subestimação do efeito dos pilares na hidrodinâmica, como no caso do cenário da Seção de 100 m.

CONCLUSÃO

A modelagem computacional do efeito da presença de pilares de pontes em domínios de grande escala precisa de uma abordagem diferenciada da discretização detalhada destas estruturas. O motivo principal para a análise de técnicas alternativas é o ainda alto custo computacional da modelagem detalhada, o que inviabiliza o estudo em simulações dinâmicas por longo período. Por esse motivo, neste trabalho avaliou-se três técnicas alternativas: Ilha Nodal (IN), Termo de Tensão Adicional (TTA) e Aumento da Rugosidade do Fundo (ARF). Do estudo se conclui:

1. Nenhuma das técnicas se mostrou capaz de representar adequadamente o escoamento na região próxima das estruturas. Assim estas técnicas não são aplicáveis para a análise do escoamento nessa região.

2. O efeito de perda de carga gerado pelos pilares pode ser incorporado de maneira razoável ao escoamento de larga escala no domínio de modelagem adjacente afastado das estruturas através desses métodos, para o caso simples de um pilar ou arranjos com poucos pilares.

3. A técnica de modelagem de IN gera perdas de carga excessivas em comparação com a modelagem detalhada, na seção longitudinal e transversal.

4. A técnica do TTA e do ARF não consegue representar o gradiente de velocidade transversal ao escoamento da mesma forma que o RM.

5. A técnica do TTA e de ARF permitem obter perdas de carga semelhantes às da modelagem detalhada na região afastada da esteira (distâncias ≥ 100 m) para o caso de 1 pilar em canal de seção retangular analisado.

6. As principais vantagens da modelagem com o TTA e ARF são: a) permitem aumentar o espaçamento da discretização espacial do domínio de modelagem reduzindo o custo computacional da simulação, b) existe a possibilidade de incluir

a presença de várias estruturas com diferentes geometrias, c) ao contrário da técnica da IN, o TTA e ARF permitem gerar uma perda de carga em toda a seção do domínio, sem criar uma barreira artificial (e.g., seção transversal de um rio), e d) o coeficiente de arrasto e a rugosidade do fundo podem ser utilizados como parâmetros de calibração.

7. No método de ARF a tensão calculada é inversamente proporcional à altura da coluna de água, o que leva a subestimar a perda de carga quando o nível da superfície livre aumentar. Por esse motivo é preferível utilizar o método do TTA ao de ARF.

8. Dos três valores de coeficiente de arrasto analisados, $C_D = 1,2$, $C_D = 0,6$, e $C_D = 2$, o primeiro, indicado por Marek (2014) para pilares circulares, e o segundo, que corresponde ao limite inferior dos medidos nas experiências de Charbeneau e Holley (2001), proporcionaram uma solução, no campo afastado da esteira (>100 m), similar à obtida no modelado detalhado do cenário com 1 pilar.

9. Nos cenários com múltiplos pilares, as simulações com $C_D = 0,6$ ofereceram um melhor ajuste a partir de 200 m (distância do nó imediatamente a jusante). Para esse coeficiente de arrasto e distância, a velocidade na esteira foi subestimada e sobrestimada no apoio de 4 e 8 pilares, respectivamente.

10. A estratégia de considerar só a primeira linha de pilares na seção transversal que obstruem o escoamento incidente não é recomendável, especialmente nos apoios com várias filas de pilares, por subestimar a perda de carga.

11. Nos casos com múltiplos pilares, recomenda-se utilizar coeficientes de arrasto diferenciados para cada pilar no apoio e assim considerar as possíveis acelerações do escoamento entre os pilares.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

REFERÊNCIAS

ARUP. *Water Quality, Appendix D3: calculation of loss coefficients for bridge piers*. Tuen Mun - Chek Lap Kok Link, Draft EIA

Report, 2007. Disponível online em: [https://www.hyd.gov.hk/en/road_and_railway/hzmb_projects/hkbcf/ema/er/Section%209%20\(App%20A1-9D6\).pdf](https://www.hyd.gov.hk/en/road_and_railway/hzmb_projects/hkbcf/ema/er/Section%209%20(App%20A1-9D6).pdf). Acesso em: maio 2015.

CHARBENEAU, R. J.; HOLLEY, E. R. *Backwater effects of piers in subcritical flow*. Research Report Number 0-1805-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 2001.

CHANG, W.; CONSTANTINESCU, G.; LIEN, H.; TSAI, W.; LAI, J.; LOH, C. Flow Structure around Bridge Piers of Varying Geometrical Complexity. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 139, n. 8, p. 812–826, Ago. 2013.

USACE - UNITED STATES OF AMERICA ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Coastal Engineering Manual*. Capítulo VI, Parte 3, 2012.

JACOBS; ARUP. Appendix 9: *Water Environment*. Forth Replacement Crossing: Environmental Statement, 2009. Disponível em: <http://www.transportscotland.gov.uk/report/j11223-000.htm>. Acesso em: jun 2015.

HRW - HR WALLINFORD. *Hydrodynamic and Scour Assessment*. Environmental Statement, Vol. 4 - Technical Appendices, 2014. Disponível em: <https://www.gardenbridge.london/reports>. Acesso em: jun. 2015.

MAREK, M. A. *Hydraulic Design Manual*. Texas Department of Transportation, 2014. Disponível online em: http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/manual_notice.htm. Acesso em: ago. 2014.

ROSMAN, P. C. C., (Ed.). *Referência técnica do SisBaHiA[®]*. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Março 2015, Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V95.pdf. Acesso em: jun. 2015.

TMGP - THE MERSEY GATEWAY PROJECT.: *Hydrodynamics and estuarine processes*. Environmental Statement 1.0, Chap. 7, 2011. Disponível online: http://www.merseygateway.co.uk/wp-content/uploads/2011/Documents/Environmental_Statement/chapter_7/eschapter07.pdf. Acesso em: jun. 2015.

VASQUEZ, J. A.; WALSH, B. W. CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow. *Proceedings 33rd LAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*; Vancouver, Canada, 2009.

Contribuição dos autores:

Eduardo González-Gorbeña: participou na elaboração do código computacional para a inclusão do termo adicional de tensão, concepção de modelagens, desenvolvimento dos modelos, figuras, e edição do texto.

Paulo C. C. Rosman: participou na elaboração do código computacional para a inclusão do termo adicional de tensão, da concepção de modelagens, edição e finalização do texto.