

## **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA SEÇÃO DE UM DUTO MARÍTIMO**

**Julia Satie Saito, [julia@dep.fem.unicamp.br](mailto:julia@dep.fem.unicamp.br)<sup>1</sup>**  
**Celso Kazuyuki Morooka, [morooka@dep.fem.unicamp.br](mailto:morooka@dep.fem.unicamp.br)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas, C.P. -6122, Campinas-SP

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Campinas, C.P. -6122, Campinas-SP

**Resumo:** Nas operações marítimas de perfuração de poços e extração de petróleo e gás natural utilizam-se dutos que conectam o poço no fundo do mar com a plataforma, denominados de risers. Dutos submarinos são utilizados também no processo de transporte de óleo e gás, do alto mar onde são produzidos até o terminal de transferência ou tratamento do gás natural na costa marítima. Estes dutos estão normalmente expostos à correnteza marítima e ondas, e quando risers, também ao movimento da plataforma flutuante à qual estão usualmente conectados. Dutos em geral sofrem uma interação com movimentos da água do mar, que acarreta normalmente o surgimento de duas componentes de força, que fazem com que o duto sofra oscilações: a força de arrasto ( $F_D$ ) na direção de incidência da água no duto, e a força de sustentação ( $F_L$ ) perpendicular à referida direção. O fenômeno da oscilação transversal, conhecido como Vibração Induzida por Vórtices (VIV), encontra-se frequentemente em sincronia com o desprendimento dos vórtices, e é importante no projeto de dutos, visto que pode ocasionar um incremento no processo de fadiga do duto, levando-o à falha. Na atualidade, a dinâmica dos fluidos computacional (Computational Fluid Dynamic – CFD) vem sendo estudada como ferramenta complementar à projetos de engenharia. Neste trabalho, apresenta-se a descrição de um modelo desenvolvido para a simulação computacional, através de CFD, do escoamento externo em torno de dutos, nas condições de seção fixa e livre, respectivamente, simulando sua vibração. Considera-se o problema bidimensional, e aplica-se o programa Ansys-CFX, o qual considera equações de Navier-Stokes e o método de volumes finitos para a solução. Apresenta-se discussões de análise da malha de elementos de domínio utilizada. Os coeficientes hidrodinâmicos de arrasto, de sustentação e o número de Strouhal são determinados a partir de  $F_D$  e  $F_L$  calculados, e comparados com dados disponíveis na literatura.

**Palavras-chave:** CFD, VIV, duto submarino, riser, correnteza marítima.

### **1. INTRODUÇÃO**

Com a descoberta de petróleo comercial na camada do pré-sal nas bacias de Santos (SP) e de Campos (RJ), o setor petrolífero no Brasil vem se expandido cada vez mais, e os estudos relacionados à perfuração de poços, exploração, extração e transporte de petróleo e gás natural, em águas profundas e ultra-profundas, são cada vez mais relevantes.

Nas operações marítimas, tubulações com seção transversal circular são normalmente utilizadas em diferentes operações, dentre elas, cita-se a perfuração de poços e a extração do petróleo e do gás natural do subsolo marinho. Estas tubulações fazem, assim, a interligação da plataforma flutuante de produção na superfície do mar com o poço produtor ou injetor, e neste caso são denominadas de risers. Dutos submarinos, colocados ao longo do leito marinho, muitas vezes com a extensão de dezenas a centenas de quilômetros, fazem o transporte do óleo ou gás (chamados de oleodutos ou gasodutos), do alto mar a um terminal na costa litorânea. Estes dutos, em geral, quando expostos à correnteza e ondas do mar, e ainda, aos movimentos da plataforma flutuante à qual está conectada, sofrem interação com a água do mar. Esta interação física presente entre o duto e o movimento das partículas de água em torno deste duto faz surgir diferenças de pressões ao redor da sua superfície externa, conforme pode ser observado, por exemplo, em Fox et al (2006), resultando em vibrações no duto. Assim, observando-se uma seção transversal circular de um duto, em um plano bidimensional, como consequência da passagem da correnteza observa-se o fenômeno de desprendimento de vórtices. Conforme Sumer e Fredsøe (1997), esta distribuição de pressão ao redor do cilindro sofre alterações periódicas que resultam na variação periódica das componentes de força no cilindro, isto é, da força de arrasto ( $F_D$ ) paralela à direção do movimento, e da força de sustentação ( $F_L$ ) perpendicular (transversal) à direção do movimento. Essas forças fazem o duto sofrer vibrações, fenômeno este conhecido como Vibração Induzida por Vórtices (VIV), importante para o projeto das tubulações submarinas visto que pode provocar sua fadiga precoce, resultando em graves acidentes com consequências econômicas, ambientais e humanas.

A Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) possibilita a simulação do escoamento de fluidos através da aplicação de métodos numéricos computacionais nas equações fundamentais da mecânica de fluidos. Esta técnica vem sendo cada vez mais pesquisada, sendo utilizada em alguns aspectos do projeto de dutos submarinos e *risers*, como por exemplo, na previsão de vibrações devido à correnteza e ondas do mar. Assim, o CFD é normalmente utilizado em complemento aos métodos numéricos baseados em modelos semi-empíricos da mecânica de fluidos que se fundamentam com resultados extraídos de experimentos em laboratórios. Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento da modelagem numérica e simulações do escoamento externo ao redor de um cilindro liso de seção circular, bidimensional. Duas situações são estudadas, sendo a primeira para o cilindro fixo no plano bidimensional, e a segunda com o cilindro livre para se transladar na direção transversal, no mesmo plano bidimensional. Para o caso do cilindro com translação, foi feita uma comparação de dois tipos de deslocamentos obtidos, o primeiro, considerando-se as forças obtidas na simulação com o cilindro fixo, e o segundo, considerando-se a força gerada no cilindro livre para movimento, devido à passagem de correnteza.

Inicialmente, foi feita uma análise para a malha do domínio fluido a ser utilizada. Equações de Navier-Stokes são consideradas nas simulações por CFD, com a aplicação do método dos volumes finitos no cálculo das variáveis de interesse do problema. A partir de  $F_D$  e  $F_L$ , obtidos numericamente pelo programa, é possível determinar os coeficientes hidrodinâmicos de arrasto ( $C_D$ ), de sustentação ( $C_L$ ) e o número de Strouhal ( $St$ ), parâmetros de interesse no caso do VIV em dutos submarinos e *risers*, e compará-los com dados disponíveis da literatura para fins de validação dos resultados.

## 2. METODOLOGIA

A técnica de análise baseada no CFD vem sendo cada vez mais utilizado em estudos numéricos para problemas de escoamento de fluido ao redor de um duto com uma seção circular. Constantinides e Oakley (2008) relatam que resultados de CFD apresentam uma boa concordância com grande variedade de escoamento na dinâmica do cilindro. Contudo, relata que para casos do escoamento ao redor de cilindros circulares, a modelagem deve apresentar uma excelente malha na região da camada limite e um modelo de turbulência adequado, para obter sucesso nos cálculos.

No presente trabalho, o software ANSYS-CFX<sup>®</sup> é utilizado. Uma ferramenta do programa gera a geometria e a malha de domínio (ANSYS Workbench) para que então a simulação do escoamento seja feita (ANSYS-CFX). A simulação está dividida em três sessões: CFX-Pre para definição dos parâmetros de análise (propriedades físicas e condições de contorno); CFX-Solver para solução do sistema de equações; e finalmente, CFX-Post para pós-processamento e visualização dos resultados.

A geração de malha é feita dividindo-se a geometria do domínio em pequenos elementos (volumes de controle), e a solução do problema é obtida com base no método dos volumes finitos. Para tanto, deve ser construída uma malha com elementos cuidadosamente escolhidos, para que o programa solucione adequadamente as equações de comportamento do fluido envolvido, e resulte em solução mais próxima do real. Abaixo estão apresentados o estudo e a análise realizados para a construção de malha, aplicada no presente trabalho. As equações de Navier-Stokes que descrevem os processos de transferência de massa, de calor e de momento são resolvidas pelo CFD para cada volume de controle.

Para fins de simplificação, e possibilitar comparação com dados disponíveis na literatura como método de estudo e validação dos desenvolvimentos, o presente trabalho se restringe ao problema bidimensional de escoamento. Tendo em vista que o programa computacional apenas considera três dimensões para solução, considerou-se uma pequena espessura ortogonal ao plano bidimensional da malha do domínio do fluido, de modo que apenas um volume de controle seja criado nesta direção.

Primeiramente, foram feitas simulações numéricas considerando uma seção circular fixa, para diferentes números de Reynolds ( $Re$ ). Fez-se a análise visual para o comportamento do escoamento e as forças  $F_D$  e  $F_L$  foram obtidas, com as quais foram calculados os respectivos coeficientes hidrodinâmicos. Em seguida, fez-se a simulação para a seção circular do cilindro com liberdade de translação na direção transversal ao escoamento. No entanto, uma mola linear é considerada como restrição ao movimento da seção nesta direção transversal. Desse modo, a malha de domínio foi tratada como sendo um sistema massa-mola-amortecedor. As forças de  $F_D$  e  $F_L$  obtidas foram comparadas com o caso da seção de cilindro fixo. Finalmente, o deslocamento do cilindro foi calculado para as forças obtidas com a seção do cilindro fixo e também foi simulada a força com a seção com liberdade de translação, respectivamente, e os resultados comparados entre si.

## 3. RESULTADOS

A Fig. (1) mostra a geometria do domínio do fluido desenhada através do ANSYS Workbench.

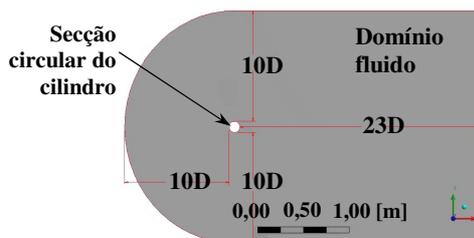


Figura 1. Geometria do domínio utilizada nas simulações.

A seção circular que simula a seção de um duto, ou ainda, um *riser* marítimo, foi feita em dimensão reduzida, com diâmetro de  $D=0,114\text{m}$ , e as distâncias à montante, à direita e à esquerda da seção no plano bidimensional, são todas de  $10D (=1,140\text{m})$ . A distância à jusante da seção circular é de  $23D (=2,622\text{m})$ . Para que a análise seja considerada bidimensional, a espessura tomada para o domínio é pequena ( $L=D/20=0,006\text{m}$ ) de modo que haja apenas um elemento de volume finito na direção perpendicular ao escoamento.

A definição dos elementos da malha de domínio é feita no CFX-Mesh. Para isto, é necessário que haja independência de malha, isto é, o resultado deve permanecer inalterado conforme ocorra um maior ou menor refinamento. Caso haja variação no resultado, a malha é inadequada à simulação e deve-se refiná-la até que a independência de malha seja atingida. Por outro lado, um refinamento muito grande exige maior esforço computacional e pode interferir na convergência dos resultados.

Para a definição da malha de elementos de domínio, inicia-se com uma malha mais simplificada, ou seja, com grandes elementos de malha, de modo que a geometria do domínio esteja bem representada. Refina-se continuamente esta malha, até se observar uma convergência nos resultados da simulação. A região em torno do cilindro é de extrema importância, pois é onde ocorre a formação e o descolamento da camada limite. Com base neste resultado, esta região deve passar por um maior refinamento da malha de elemento. Para isso, utilizou-se a condição de  $y^+$ , distância adimensional da parede, em função da distância entre a parede e o nó mais próximo a ela ( $\Delta y$ ), do diâmetro da seção circular ( $D$ ) e do número de Reynolds ( $Re_D$ ), e calculada a partir da Eq. (1), conforme indicação no ANSYS CFX (2006):

$$\Delta y = Dy^+ \sqrt{80} Re_D^{-13/14} \quad (1)$$

onde  $Re_D$  é função da velocidade ( $v$ ), da massa específica ( $\rho$ ) e da viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) do fluido, na Eq. (2):

$$Re_D = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (2)$$

O modelo de turbulência *Shear Stress Transport* (SST) foi utilizado para as simulações e, segundo ANSYS (2006), o valor de  $y^+$  adotado para este modelo deve ser menor ou igual a 2. As simulações são feitas para diferentes  $Re_D$ , até o máximo de  $Re_{D\text{máx}}=1 \times 10^6$ , sendo calculado o  $\Delta y$  crítico para a malha através da Eq. (1). Este cálculo resultou num valor de  $\Delta y=5,47 \times 10^{-6}\text{m}$ . Assim, para  $Re_D < Re_{D\text{máx}}$ , o  $\Delta y$  estará de acordo com a condição  $y^+ \leq 2$ .

Definido-se assim, o valor de  $y^+$ , testou-se a independência dos resultados com as malhas. Para isso, as propriedades físicas, as condições de contorno e de *solver* foram consideradas sendo as mesmas para todas simulações de teste, possibilitando assim, a comparação entre os resultados. As propriedades físicas adotadas para o fluido (água, a  $25^\circ\text{C}$ ) são encontradas na biblioteca do programa, e são  $\rho=997 \text{ kg/m}^3$  e  $\mu=0,0008899 \text{ Pa.s}$ . As condições de contorno adotadas são conforme a seguir:

- Parede (*Wall*) : condição adotada em torno da seção circular, que trata a fronteira como uma parede lisa em que não há deslizamento, isto é, a tensão de cisalhamento é infinita e a velocidade é nula na parede.
- Entrada (*Opening*) : condição adotada na face arredondada com raio igual a  $10D$  e localizada à montante da seção circular. Nesta face, o programa assume que o fluido pode estar tanto entrando quanto saindo do domínio, e foram prescritos os componentes de velocidade cartesiana:  $u=1,5659\text{m/s}$ ,  $v=0\text{m/s}$  e  $w=0\text{m/s}$ . A intensidade de turbulência é média.
- Saídas (*Opening*) : condição adotada nas faces lateral e posterior (jusante da seção circular). Nestas faces novamente o fluido pode estar tanto entrando quanto saindo do domínio e foi adotada a pressão estática de  $0 \text{ Pa}$  para o fluido.
- Simetria (*Symmetry*): condição adotada na face inferior e superior do domínio fluido. Nestas faces a velocidade normal à face (componente  $w$ ) é nula e as velocidades no plano do escoamento (componentes  $u$  e  $v$ ) são iguais aos valores resultantes ao longo da simulação.

O passo de tempo (*timestep*) utilizado é de  $0,005 \text{ s}$ , e adotou-se o máximo de 10 iterações para cada passo de tempo.

Define-se também um conjunto de valores iniciais para iniciar o processo iterativo. Assim, os componentes cartesianos de velocidade são ( $u=1,5659$  m/s,  $v=0$  m/s e  $w=0$  m/s), a pressão relativa ( $P=0$  Pa), e os valores de  $k$  e de  $\epsilon$  da turbulência são adotados aqueles definidos automaticamente pelo programa neste processo de cálculo.

Para comparar os resultados obtidos em cada malha estudada, observou-se o comportamento do escoamento para um mesmo instante de tempo, além das forças de arrasto ( $F_D$ ) e de sustentação ( $F_L$ ). Com estes resultados foram calculados os coeficientes hidrodinâmicos de arrasto ( $C_D$ ), de sustentação ( $C_L$ ) e o número de Strouhal ( $St$ ). Estes cálculos consideram a média da série temporal para  $F_D$  e o valor de pico para  $F_L$ , quando a solução atinge o regime estacionário. As Eq. (3) e (4) apresentam a definição para os coeficientes de arrasto e sustentação, respectivamente:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho D L v^2} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho D L v^2} \quad (4)$$

Considerando a normalização da frequência de desprendimento de vórtices ( $f_v$ ) com a velocidade do fluido ( $v$ ) e com o diâmetro do cilindro ( $D$ ), pode-se definir o número adimensional de Strouhal ( $St$ ), conforme mostra a Eq. (5):

$$St = \frac{f_v D}{v} \quad (5)$$

O primeiro teste foi feito iniciando-se com uma malha mais simples e menos detalhada para o domínio em estudo. O escoamento resultante deste teste foi simétrico e sem a ocorrência do desprendimento de vórtices. No segundo teste, a região em torno da seção circular foi detalhada e refinada, e mesmo assim, os resultados das simulações foram de escoamento sem desprendimento de vórtices. Apenas no terceiro teste observou-se o desprendimento de vórtices, com a aplicação de uma malha mais refinada do que as anteriores, particularmente na região ao redor da seção circular e da esteira de vórtices. Diminuindo-se o tamanho dos elementos ao redor da seção circular e da região de esteira, o quarto teste apresentou mudança de comportamento do escoamento, em relação aos anteriores, além de mudança nos coeficientes hidrodinâmicos encontrados. O quinto teste tratou da utilização de malha com elementos ainda menores do que as anteriores. Entretanto, neste último caso não houve mudança significativa no comportamento do escoamento e também dos coeficientes hidrodinâmicos. Os coeficientes hidrodinâmicos encontrados em todos estes testes estão mostrados na Tab. (1), a seguir:

**Tabela 1. Valores calculados dos coeficientes hidrodinâmicos nos testes feitos para a construção da malha.**

Teste	Nº de nós	Nº de elementos	$C_D$	$C_L$	$St$
01	6470	5880	0,53	0,01	-
02	9218	8142	0,35	0,08	0,281
03	27044	24932	0,35	0,33	0,276
04	84000	55154	0,70	0,41	0,239
05	105478	76588	0,69	0,42	0,243

Assim sendo, com o objetivo de se reduzir o esforço computacional, a malha escolhida para as simulações foi a que apresentou a menor quantidade de elementos e cuja convergência de resultados tenha sido atingida para a solução esperada, isto é, a malha utilizada no Teste 04 (Tab. (1)), mostrada na Fig. (2).

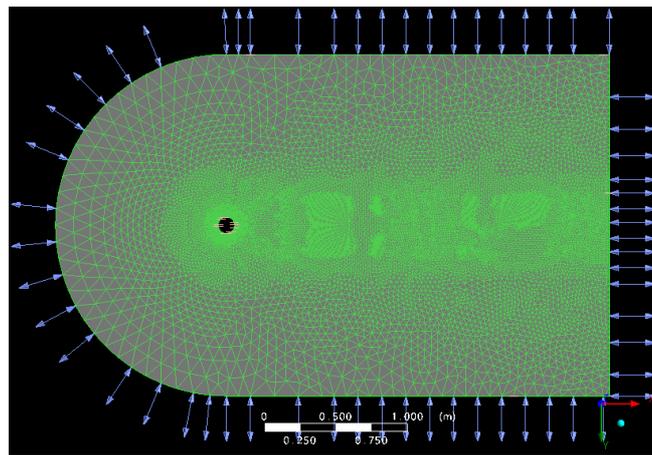


Figura 2. Malha de elementos aplicados para o domínio fluido nas simulações realizadas.

### 3.1. Simulação De escoamento Ao Redor De Uma Seção Circular Fixa

A simulação de escoamento de fluido ao redor de uma seção circular fixa foi feita com as mesmas propriedades físicas e condições de contorno utilizadas no teste para definição de malha, alterando-se apenas o valor da velocidade do fluido para se obter diferentes valores de  $Re$ , numa faixa entre 2000 e 800000.

De acordo com ANSYS (2006), para valores de  $Re$  menores de 20000, o escoamento deve ser considerado como laminar pelas configurações do CFX. De acordo com Menter (1994), o modelo de turbulência SST, utilizado nos outros casos, tem uma previsão bem exata do início e da montante da separação do fluxo em gradientes de pressão adversos, com a inclusão dos efeitos do transporte para a formulação da viscosidade turbulenta, o que resulta em grande melhoria em termos de previsão da separação do fluxo. Segundo Stravopoulos et al (2005), o modelo SST é um híbrido dos modelos  $k-\epsilon$  e  $k-\omega$ . O desenvolvimento do modelo SST diminui as deficiências destes dois outros modelos, caracterizando um "limitador" para a equação de viscosidade turbulenta que leva em conta o transporte das tensões cisalhantes turbulentas, as quais têm sido deficientes nos modelos de viscosidade turbulenta. Assim, o modelo SST usa basicamente o modelo  $k-\omega$  nas regiões perto da parede e  $k-\epsilon$  nas regiões longe da mesma, em termos de dinâmica do fluido. Aprofundando mais o estudo, observou-se que para altos valores de  $Re$ , o modelo de turbulência SST deve ser combinado com um modelo de transição chamado de  $\gamma-\theta$ .

O histórico de tempo das forças de arrasto ( $F_D$ ) e de sustentação ( $F_L$ ) para uma velocidade de escoamento de 1,50m/s, cujo  $Re$  vale 191580, é mostrado na Fig. (3), junto com a transformada de Fourier.

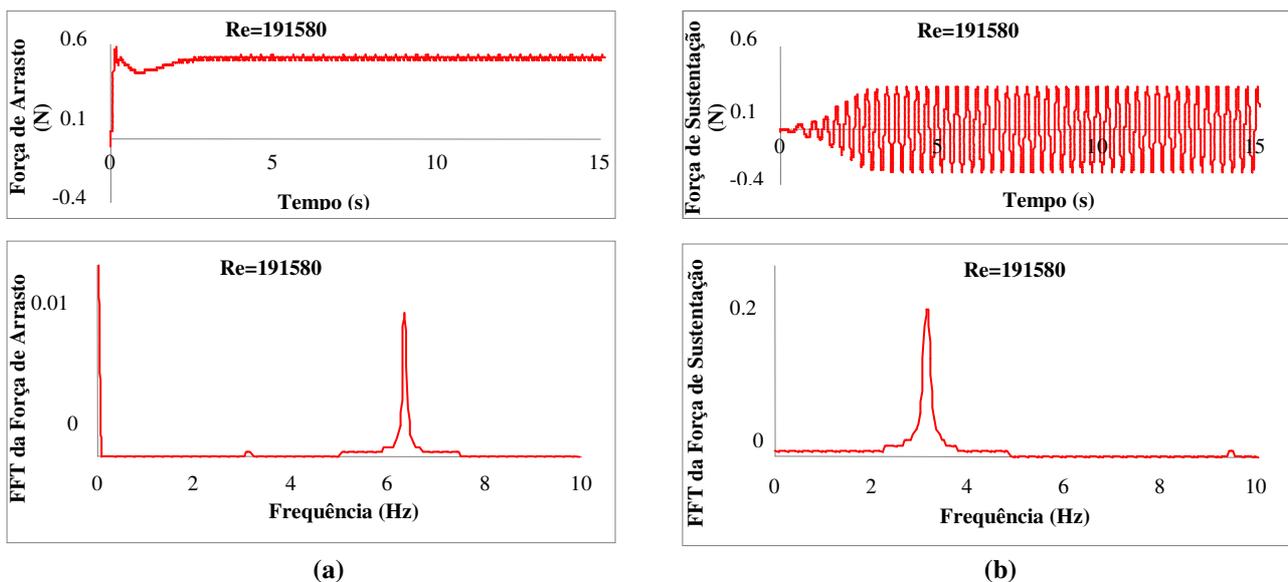


Figura 3. Resultados da simulação numérica do escoamento ao redor da seção do cilindro fixo.  
 (a) Resultados para força de arrasto ( $F_D$ ); (b) Resultados para força de sustentação ( $F_L$ ).

As duas forças em questão são oscilatórias. A força de arrasto possui uma amplitude baixa, cerca de 20 vezes menor que a força de sustentação, porém, seu módulo é maior em relação à mesma. Bishop e Hassan (1964) afirmam que a frequência da força de arrasto é duas vezes maior do que a frequência da força de sustentação, a qual está

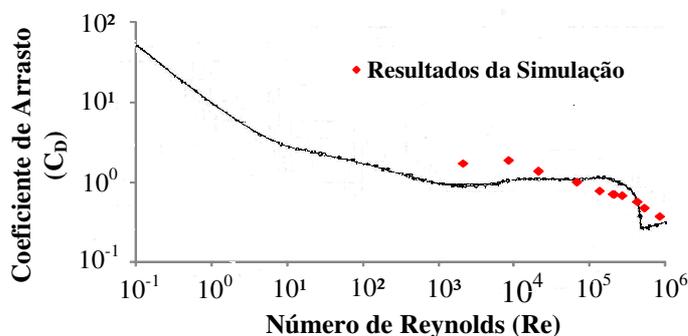
relacionada com o desprendimento de vórtices, conforme mostram os resultados das simulações, apresentados através da Fig. (3), cuja visualização mostra que a frequência da força de arrasto é próxima de 6,2Hz e da força de sustentação é metade deste valor, em torno de 3,1Hz.

Os resultados obtidos para diferentes Re nas simulações de escoamento de fluido ao redor de uma seção circular fixa estão mostrados na Tab. (2).

**Tabela 2. Resultados obtidos da simulação numérica para o cilindro fixo**

Vel. (m/s)	Reynolds	$F_D$ (N)	$C_D$	$F_L$ (N)	$C_L$	$\Delta t$ (s)	T (s)	$f_v$ (Hz)	St	Turbulência
6,26	800000	4,70	0,37	2,06	0,16	0,005	0,06	15,61	0,28	SST $c/\gamma-\theta$
3,91	500000	3,10	0,62	0,98	0,20	0,005	0,10	9,78	0,28	SST $c/\gamma-\theta$
3,13	400000	1,80	0,57	0,64	0,20	0,005	0,13	7,81	0,28	SST $c/\gamma-\theta$
2,00	255440	0,88	0,68	0,52	0,40	0,005	0,23	4,29	0,24	SST
1,57	200000	0,56	0,70	0,33	0,41	0,005	0,30	3,31	0,24	SST
1,50	191580	0,52	0,71	0,30	0,41	0,005	0,32	3,15	0,24	SST
1,00	127720	0,25	0,77	0,17	0,54	0,005	0,48	2,08	0,24	SST
0,50	63860	0,08	1,01	0,09	1,06	0,005	0,98	1,02	0,23	SST
0,16	20000	0,01	1,37	0,01	1,53	0,005	3,24	0,31	0,22	SST
0,06	8000	0,00	1,88	0,00	1,77	0,005	7,50	0,13	0,24	Laminar
0,02	2000	0,00	1,71	0,00	1,80	0,005	28,90	0,04	0,25	Laminar

Através dos dados calculados contidos na Tab. (2), observa-se que a força de arrasto aumenta com o aumento de Re. Segundo Shapiro (1961), a força de arrasto provocada pelo escoamento de fluido ao redor de corpos com diferentes formas geométricas é proporcional ao quadrado da velocidade, validando as simulações feitas para o caso do cilindro circular fixo. Percebe-se também que conforme o número de Reynolds aumenta, no geral, os coeficientes hidrodinâmicos de arrasto e de sustentação diminuem. O número de Strouhal (St) se mantém próximo à faixa de 0,24 na maioria das simulações, exceto para altos valores de Reynolds, em que este coeficiente chega a 0,28. As comparações dos coeficientes obtidos através de simulação numérica com dados da literatura estão nas Fig. (4) a (6).



**Figura 4. Comparação dos coeficientes de arrasto ( $C_D$ ) obtidos pela simulação numérica e a literatura, retirado de Fox et al (2006).**

Na Fig. (4), o decaimento do coeficiente de arrasto com o aumento de Reynolds na faixa próxima a  $10^5$  é bem acentuado devido à crise do arrasto. Aguiar e Rubine (2005) explicam a crise do arrasto para uma esfera no ar. Em analogia com o caso estudado neste trabalho, interpreta-se que para valores de Reynolds maiores de 20, há separação da camada limite, gerando uma esteira. Esta separação causa uma diminuição significativa da pressão à jusante do cilindro e a diferença das pressões à montante e à jusante passam a dominar o arrasto. A crise do arrasto ocorre, então, quando a camada limite torna-se turbulenta, pois a turbulência faz com que a camada resista melhor à tendência de separação e o ponto de descolamento da camada limite move-se para a parte mais posterior do cilindro, diminuindo a área da esteira. Isto reduz a área do cilindro submetida a baixas pressões e causa uma diminuição da resistência do fluido, ou seja, da força de arrasto. Este decaimento brusco de  $C_D$ , devido à crise do arrasto, não é evidente nas simulações como observado nos resultados experimentais da literatura, em geral. Entretanto, a diminuição deste coeficiente nos valores do número de Re próximos a esta região é bastante notável.

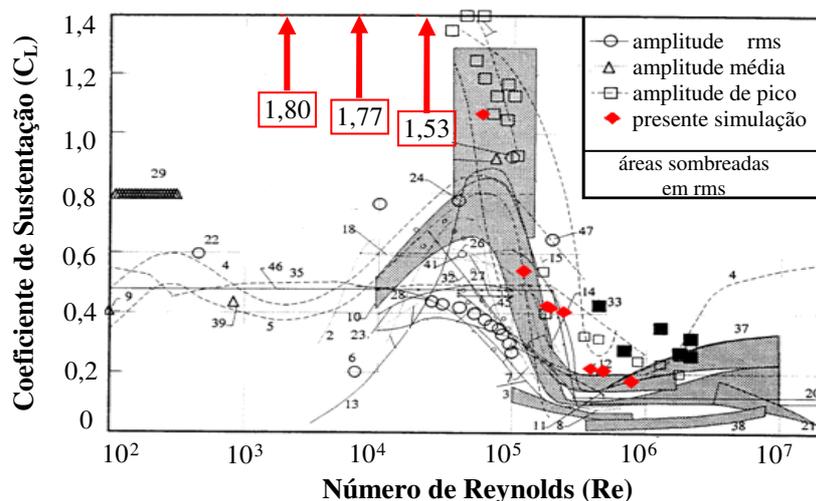


Figura 5. Comparação dos coeficientes de sustentação ( $C_L$ ) obtidos pela simulação numérica e a literatura, adaptado de Pantazoupoulos (1994).

A Fig. (5) apresenta os valores de pico do coeficiente de sustentação obtidos através das simulações numéricas, que se ajustam aos valores de pico deste coeficiente obtidos em modelos testes representados por Pantazoupoulos (1994) em cilindros estacionários e com baixa intensidade de turbulência de escoamento e rugosidade de superfície. O coeficiente de sustentação obtido tanto nas simulações numéricas, quanto nos resultados experimentais, apresenta também uma queda abrupta próximo da faixa de  $Re$  de  $10^5$ .

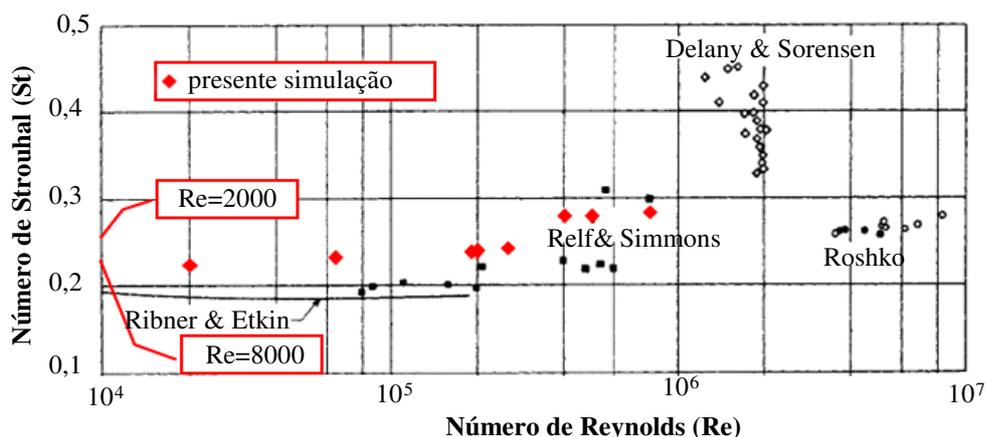


Figura 6. Comparação do número de Strouhal ( $St$ ) obtido pela simulação numérica e a literatura, adaptado de Roshko (1961).

A Fig. (6) mostra que os dados obtidos numericamente para  $St$  nas simulações se encontram próximos dos dados experimentais obtidos da literatura na faixa de  $Re$  entre  $10^4$  e  $10^6$ . Conforme os resultados da literatura, o número de Strouhal para valores de  $Re$  próximos de  $10^6$ , apresenta um leve acréscimo, concordando com os resultados numéricos apresentados na Fig. (6).

### 3.2. Simulação do Escoamento ao Redor de uma Seção Circular com Livre Translação

Considerando a seção circular com liberdade de translação, o movimento acontece devido às forças que vão sendo geradas conforme o escoamento do fluido, simulando o movimento do duto gerado pela correnteza e ondas do mar, e movimentos da plataforma flutuante. Para isso, faz-se na simulação, uma união das soluções do domínio do fluido com o do sólido, que é denominada de interação fluido-estrutura (FSI-*Fluid Structure Interaction*). A oscilação do cilindro pode ser representada pelo movimento de um corpo sólido com um grau de liberdade, considerando que ele só se move na direção transversal, impondo uma mola de constante  $k$ , como restrição ao movimento.

Segundo Menter et al (2006), a resposta do cilindro às forças externas do fluido pode ser descrita através de uma equação diferencial ordinária, conforme as Eq. (6) a (9). Nestas equações,  $m_{duto}$  é a massa do duto no sistema;  $\ddot{y}$  é a aceleração do sistema;  $c$  é o coeficiente de amortecimento;  $\dot{y}$  é a velocidade do sistema;  $y$  é o deslocamento do sistema;

$F_{\text{fluido}}$  é a força exercida pelo fluido sobre o duto;  $v_{\text{duto}}^t$  e  $v_{\text{duto}}^{t+\Delta t}$  são as velocidades do sistema no passo de tempo atual e seguinte, respectivamente;  $D_{\text{duto}}^t$  e  $D_{\text{duto}}^{t+\Delta t}$  são os deslocamentos do sistema no passo de tempo atual e seguinte, respectivamente; e  $\Delta t$  é o passo de tempo (*timestep*) utilizado (0,005s) nas simulações.

$$m_{\text{duto}} \ddot{y} + c \dot{y} + ky = F_{\text{fluido}} \quad (6)$$

$$\ddot{y} = \frac{v_{\text{duto}}^{t+\Delta t} - v_{\text{duto}}^t}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\dot{y} = \frac{D_{\text{duto}}^{t+\Delta t} - D_{\text{duto}}^t}{\Delta t} \quad (8)$$

$$y = D_{\text{duto}}^{t+\Delta t} \quad (9)$$

Substituindo as Eq. (7), (8) e (9) na Eq. (6) e isolando a variável  $D_{\text{duto}}^{t+\Delta t}$ , chega-se à Eq. (10), que é a equação que determina o movimento do cilindro, a ser introduzida no CFX.

$$D_{\text{duto}}^{t+\Delta t} = \frac{F_{\text{fluido}} + \left( \frac{m_{\text{duto}} * v_{\text{duto}}^t}{\Delta t} + \frac{m_{\text{duto}} * D_{\text{duto}}^t}{\Delta t^2} + \frac{c * D_{\text{duto}}^t}{\Delta t} \right)}{\left( k + \frac{m_{\text{duto}}}{\Delta t^2} + \frac{c}{\Delta t} \right)} \quad (10)$$

Estudos e dados experimentais permitem calcular o valor de  $m_{\text{duto}}$ ,  $c$  e  $k$ . A determinação de  $k$  foi feita por Ribeiro (2007), definindo um valor de  $C_L$  máximo igual a 2, de modo que a uma velocidade de correnteza de 0,50 m/s, resulta numa força de sustentação de 0,16N. Tomando esta força como sendo a força da mola, e um deslocamento de 1D ( $=0,114\text{m}$ ), a massa do duto é encontrada através da definição de frequência natural, encontrada experimentalmente. O valor de  $c$  também é encontrado com base em dados experimentais de Ribeiro (2007), utilizando o valor da razão de amortecimento equivalente, uma razão entre a constante de amortecimento e o amortecimento crítico. Os valores encontrados de  $k$ ,  $m_{\text{duto}}$  e  $c$  foram 1,43N/m, 0,27kg e 0,03N.s/m, respectivamente. Para estes valores, a força transversal ( $F_L$ ) e o deslocamento obtido pela simulação numérica através de CFD para um escoamento com velocidade de 1,50m/s, cujo  $Re$  vale 191580, estão mostrados na Fig. (7).

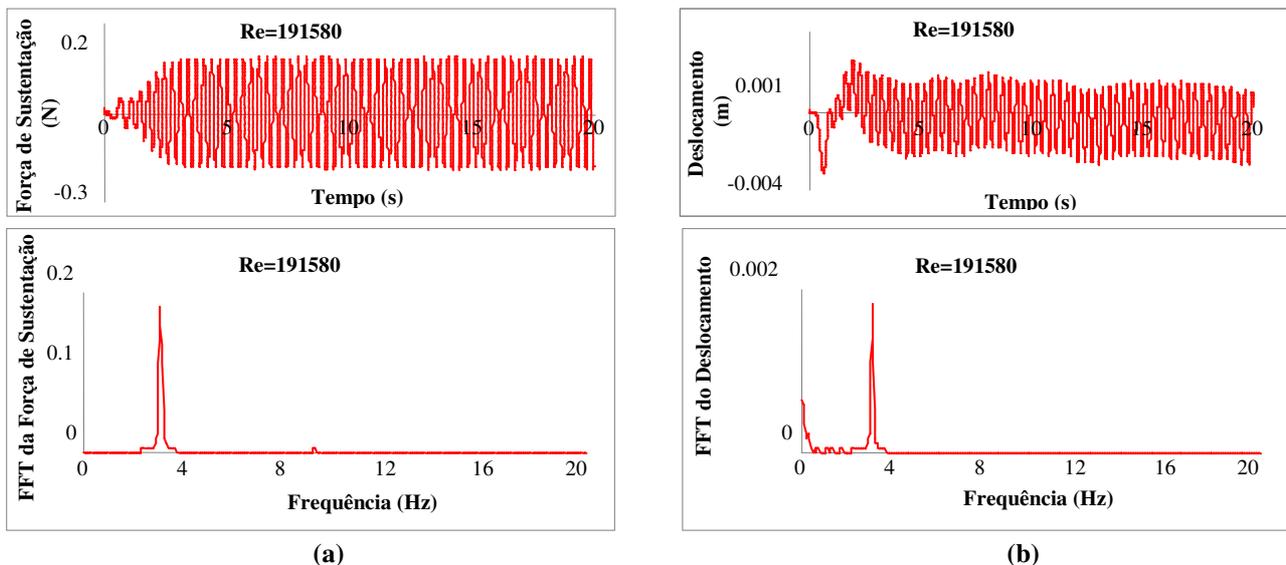
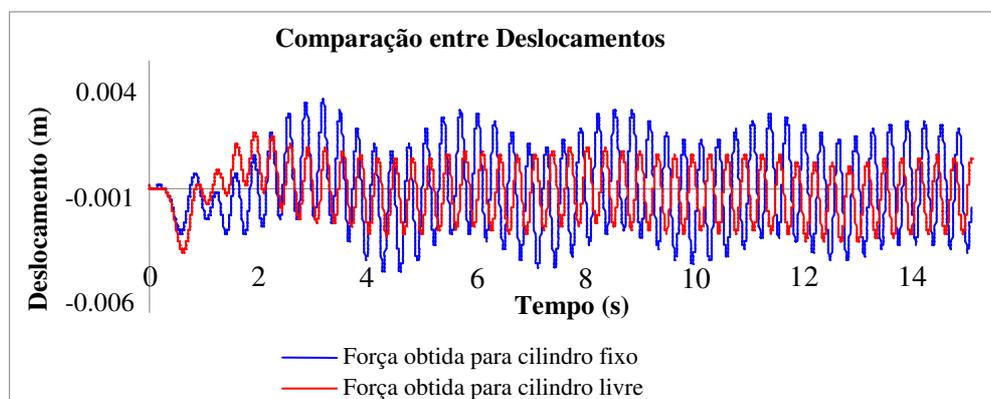


Figura 7. Resultado da simulação numérica do escoamento ao redor da seção do cilindro com liberdade de movimento. (a) Resultados para força de arrasto ( $F_D$ ); (b) Resultados para força de sustentação ( $F_L$ ).

Observa-se que para um mesmo  $Re$ , a amplitude da força de sustentação diminui quando se considera a seção circular com livre translação na direção transversal (Fig. (7a)), em relação a uma seção circular fixa (Fig. (3b)). Uma vez que no primeiro caso o cilindro está livre para se mover na referida direção, a passagem do fluido do escoamento em torno da parede do cilindro é facilitada. A frequência de oscilação permanece praticamente a mesma no caso da seção circular fixa e livre, em torno de 3,1Hz.

A Fig. (7b) mostra que o cilindro se move na mesma frequência de excitação (frequência de  $F_L$ ), de aproximadamente 3,1Hz. Hooft (1982) explica este fato afirmando que em movimentos amortecidos, a componente do movimento na frequência natural desaparece após o estado transiente, permanecendo apenas o movimento na frequência de excitação, conforme observa-se nos resultados numéricos obtido pela simulação.

Utilizando a força transversal obtida para o cilindro fixo em  $Re=191580$  como  $F_{\text{fluido}}$  na Eq. (10), o cálculo do deslocamento foi feito algebricamente, considerando-se os mesmos valores de  $m_{\text{duto}}$ ,  $k$  e  $c$ . Estes resultados são comparados com o deslocamento obtido na simulação do escoamento com o cilindro com liberdade de translação, conforme é apresentado na Fig. (8).



**Figura 8. Comparação entre deslocamentos calculados com a força obtida para o cilindro fixo e livre, respectivamente.**

Como esperado, uma vez que a força do cilindro fixo é maior que a força que atua em um cilindro livre para oscilar, a amplitude do deslocamento obtido utilizando a primeira também é maior que a amplitude do mesmo considerando a segunda força. Além disso, pode-se perceber que o deslocamento utilizando a força extraída do cilindro livre atinge o estado estacionário mais rapidamente.

#### 4. CONCLUSÕES

Simulações numéricas foram realizadas para uma extensa faixa do número de Reynolds ( $Re=10^3\sim 10^6$ ), considerando-se o escoamento de fluido ao redor de uma seção transversal de um duto submarino. Para a seção circular fixa, em geral, os coeficientes hidrodinâmicos obtidos pela simulação numérica apresentam-se coerentes com os dados disponíveis na literatura. Na análise realizada com movimento da seção transversal, isto é, com translação da seção no plano bidimensional, a amplitude da força na direção transversal à incidência do escoamento diminuiu, embora a frequência desta força permaneça muito próxima daquela em que a mesma seção está estacionária (fixa).

Comparando-se os deslocamentos calculados com a força obtida para a seção circular estacionária e com oscilação livre, respectivamente, percebe-se que para a força obtida para a seção no primeiro caso (estacionário), o deslocamento obtido é, em geral, maior do que o segundo caso (oscilação livre). Portanto, a consideração de duto submarino ou *riser* marítimo estacionário para considerações de coeficientes hidrodinâmicos dos mesmos, deve ser aplicada com cautela. Assim sendo, simulações numéricas em condições mais próxima do real, e considerando-se o cilindro se movendo ao longo da correnteza incidente, e ainda, complementar esta análise com resultados experimentais de laboratório são de fundamental importância para compreensão correta e adequada do fenômeno.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP (CTPetro) e a Petrobras no apoio a presente pesquisa.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Aguiar, C.E., Rubine, G., "A Aerodinâmica da bola de futebol". Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol. 26, n.4, p 297-308, 2004.
- ANSYS CFX – Release 11.0, 2006.
- Bishop, R. E. D., Hassan, A. Y., "The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid", Phil. Trans. Royal Society, London, A 277, 51-75, 1964.
- Constantinides, Y., Oakley, O.H., "Numerical prediction of VIV and comparison with field experiments". In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, 2008, Estoril, Portugal.
- Fox, R. W., Mc Donald, A. T., Pritchard, P. J., "Mecânica dos Fluidos", 6<sup>th</sup> ed., Livros Técnicos e Científicos, 2006.
- Hooft, J. P., "Advanced Dynamics of Marine Structures", Wiley-Interscience, New York, 1982.

- Menter, F., Yakubov, S., Sharkey P., Kuntz, M., "Overview of Fluid-Structure Coupling in Ansys-CFX". In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, 2006, Hamburg, Germany.
- Menter, F.R., "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", AIAA-Journal., 32(8), pp. 1598 – 1605, 1994.
- Pantazopoulos, M.S., "Vortex-Induced Vibration Parameters: Critical Review." OMAE 1994.
- Ribeiro, E.J.B., "Análise Numérica e Experimental de Interferência de *Risers* Rígidos Verticais". Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2007.
- Roshko, A., "Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number". J. Fluid Mech. 10(3) 345-356, 1961.
- Shapiro, A.H., "Shape and flow: the fluid dynamics of drag". Soubleday and Co., Inc., Garden City, N.Y., 1961.
- Stravopoulos, M., Charesworth, D., Dixon, M., "The Application of CFD for Vortex Induced Vibration Analysis of Marine Risers In Projects Marine 2005", 2005.
- Sumer, B. M., Fredsøe, J., "Hydrodynamics around Cylindrical Structures", World Scientific, 1997.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# COMPUTATIONAL SIMULATION OF FLUID FLOW AROUND A TRANSVERSAL SECTION OF A SUBSEA PIPELINE

Julia Satie Saito, [julia@dep.fem.unicamp.br](mailto:julia@dep.fem.unicamp.br)<sup>1</sup>  
Celso Kazuyuki Morooka, [morooka@dep.fem.unicamp.br](mailto:morooka@dep.fem.unicamp.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State University of Campinas, C.P. -6122, Campinas-SP

<sup>2</sup>State University of Campinas, C.P. -6122, Campinas-SP

**Abstract:** *In offshore drilling and production operations for oil and natural gas production, underwater pipelines are commonly used. They are connections between the wellhead at seabed to a floating production platform named risers, and they can also serve to transport oil and gas from the offshore petroleum field to a terminal transfer at the coast, and in this case they are named subsea pipelines. Pipelines are normally exposed to sea currents and ocean waves, and the risers to the motions of the floating platform in which they are connected. Pipelines, in general, interact with the motion of the sea water fluid particle, which usually result in two kinds of force components which make the pipeline to oscillates. They are the drag force ( $F_D$ ) in the direction of incidence of fluid particle flow water into the pipeline, and the lift force ( $F_L$ ) which is in the perpendicular to the first direction. The phenomenon of transverse oscillation, the well known Vortex Induced Vibration (VIV), is often in synchronism with the fluid flow vortex shedding. This oscillation is very important to be considered in subsea pipeline designs because it can cause an increase in the material fatigue process leading to a fail. Nowadays, Computational Fluid Dynamics (CFD) is an important tool for engineering projects. The present paper describes a model developed for fluid flow around subsea pipeline for numerical simulations through CFD. Fixed and free to move two dimensional pipeline transversal sections are taken into account, and oscillations are calculated, respectively. Fundamental Navier-Stokes equations and the finite volume method are considered in the solutions, and a commercial computer program (Ansys-CFX) is applied. Analysis and discussions are carried out regarding mesh elements and fluid domain. Hydrodynamic force coefficients for drag and lift, and the Strouhal number are determined from the  $F_D$  and  $F_L$  obtained from the simulations, and they are compared with data available from the literature.*

**Keywords:** *subsea pipelines, risers, sea current, ocean waves, VIV, CFD.*