

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

HIDRODINÂMICA COMPUTACIONAL DE VIBRAÇÕES EM ARRANJOS DE RISERS

AUTORES:

Carlos Eduardo da Silva, Nestor Oscar Guevara e José Luis Drummond Alves

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia, LAMCE/COPPE/UFRJ

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

HIDRODINÂMICA COMPUTACIONAL DE VIBRAÇÕES EM ARRANJOS DE RISERS

Abstract

This work presents a progress report on the development, verification and validation of a finite element software for complex fluid-structure interactions designed for offshore hydrodynamics. Sloshing of liquids in tanks, wave breaking in ships, offshore platforms motions and green water on decks are important examples of this class of problems. The software uses edge-based parallel stabilized finite elements for both the Navier-Stokes equations and the Volume-Of-Fluid method for the free-surface. Turbulence is treated by a Smagorinsky model. Mesh movement is treated by the Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) formulation. Mesh updating is accomplished by a parallel edge-based solution of a scalar diffusion problem in each spatial coordinate. Problem statement for mesh updating process includes a spatially varying diffusion coefficient, dependent on a geometric quality index. Boundary conditions involve the motion of the immersed body's surface, i.e., the fluid-structure interface, taken as the Lagrangian portion of the domain in the overall problem. We show the robustness of the mesh movement strategy solving a rolling vessel problem. We also show two verification and validation problems, a two-riser configuration exposed to cross-flow.

Introdução

No País é notadamente reconhecida a importância da engenharia na garantia de continuidade da ascensão industrial, tão pronunciada na última década, em particular na indústria do petróleo e gás. Com as recentes descobertas de extensas reservas de hidrocarbonetos assentados abaixo de grandes camadas de sal, denominados por reservatórios do pré-sal, romper o desafio tecnológico envolvido neste cenário tomou proporções de questão e soberania nacional.

As reservas do pré-sal além de estarem localizadas em grandes profundidades abaixo de leito marinho também se encontra em águas ultraprofundas, daí todas as tecnologias já desenvolvidas para as regiões do pós sal deverão ser revisitadas e adaptadas à este cenário desafiador do pré-sal, em particular as tecnologias envolvidas nos problemas de vibrações induzidas por vórtices (VIV) em risers de produção e perfuração.

A concepção de arranjos de linhas de risers tem adquirido importância ainda maior em empreendimentos de produção de petróleo localizados em águas ultraprofundas, situação encontrada na região do pré-sal. O número de linhas admissíveis em uma unidade flutuante tem impacto direto em sua viabilidade econômica.

Neste sentido há sempre a relação de compromisso entre a quantidade de risers instalados, que exibe relação direta entre os espaçamentos das linhas, e as interferências nos movimentos entre cada linha do arranjo e do arranjo com a unidade flutuante. A figura a seguir mostra alguns cenários destes arranjos em unidades flutuantes.



Figura.1 – Arranjos de risers.

Um estudo sobre a fenomenologia destas interferências deve incluir a natureza do escoamento em alto mar, assim como a hidrodinâmica do sistema isolado linha-linha, e do sistema acoplado linhas-plataforma. Uma análise imprecisa deste fenômeno pode contribuir para que situações de colisões, não previstas ou em uma frequência acontecimentos maior que as previstas em projetos, entre as linhas de risers. Em um extremo, o descomissionamento destas linhas pode acontecer, neste caso, causando prejuízos consideráveis.

Inúmeras entidades reguladoras e de classificação do setor de serviços offshore já indicam considerações mínimas neste tema; em destaque está a DNV que, em seu documento (Recommended Practice – Riser Interference, 2009), menciona uma série de considerações em projetos de linhas de risers, especialmente nos tópicos de VIV (vibrações induzidas por vórtices) e WIO (oscilações induzidas na esteira do escoamento).

Os estudos desenvolvidos dentro tema VIV têm produzido importantes contribuições ao projeto de linhas de risers, em especial os ensaios experimentais catalogados na literatura. O uso de ferramentas computacionais para representar as VIV's se difundiu consideravelmente com os modelos equivalentes de Morrison, entretanto análises acopladas de interação fluido viscoso e incompressível com estruturas rígidas ou flexíveis ainda é um tema em aberto. É neste cenário que este trabalho irá contribuir ao estado-da-arte em análises de interação fluido-estrutura em escoamentos complexos via análise computacional com uso do código computacional EdgeCFD, desenvolvido pelo NACAD/UFRJ.

Em uma esteira de escoamento turbulento passando por um arranjo de risers, ressalta-se que o valor típico do número de Reynolds em correntes marítimas escoando perpendicularmente a um riser é na ordem de 105, há formação de zonas de baixa e alta pressão que podem gerar nas linhas de riser grandes problemas de estabilidade, por exemplo: altas amplitudes de movimentos transversais ao escoamento, excessivas variações de tensões em linhas tracionadas e múltiplas colisões. O código desenvolvido tem importantes potencialidades na representação de escoamentos turbulentos e em análises de interação fluido-estrutura, para uma consulta a essas potencialidades sugerem-se os artigos de Lins et al 2009 e Silva et al 2009.

A partir de ensaios físicos, Huse 1996 indicou importantes recomendações em análises de arranjos de risers, em seu trabalho foram identificadas situações de colisão e formação de esteira de

vórtices, entretanto um procedimento de quantificação de danos nas colisões e consideração da resistência longitudinal da linha não foi desenvolvido.

Dentro deste contexto, fica clara uma demanda por simuladores que contemplem análises de contato-impacto de múltiplos corpos quando imersos em escoamentos turbulentos. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta o código EdgeCFD sob uma formulação de elementos finitos deformáveis integrados no tempo com um dispositivo de detecção de contatos.

Neste trabalho é apresentada uma formulação matemática para descrever os princípios de conservação da Mecânica do Contínuo para analisar aplicações de interação fluido estrutura. Basicamente são desenvolvidas metodologias de representar fluidos e estruturas em uma formulação única, aqui denominada de formulação ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian). Após serem estabelecidos os conceitos básicos da formulação ALE, são apresentadas as formulações de elementos finitos em sua forma variacional enfequecidas via resíduos ponderados das equações de conservação do contínuo. Procedimentos de atualização de malha para elementos finitos tetraédricos também são apresentados.

Metodologia

- **Mecânica dos Fluidos descrita em uma Formulação ALE**

As equações que governam o escoamento de fluidos viscosos, incompressíveis e Newtonianos são descritas pelas equações de Navier-Stokes:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} - \mathbf{v}_{\text{mesh}}) \cdot \nabla \mathbf{u} - \mathbf{g} \right] - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Onde

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + 2\mu\nabla^s \mathbf{u}$$

e $\mathbf{u}$, p , $\mathbf{g}$, ρ and μ são o campo de velocidade do fluido, a pressão, a gravidade, a massa específica e a viscosidade do fluido, respectivamente e $\mathbf{v}_{\text{mesh}}$ é a velocidade da malha de elementos finitos.

- **Dinâmica de corpo rígido para o Riser**

Neste trabalho, o riser imerso foi considerado um corpo rígido, portanto, seu movimento pode ser convenientemente descrito por 6 (seis) graus de liberdade (três deslocamentos e três rotações), tomada em seu centro de massa. O peso próprio e as forças hidrodinâmicas atuando na superfície do corpo estão resumidas a resultante das forças e momentos encaminhados ao centro de massa. Estas forças hidrodinâmicas são avaliadas com base nos campos $(\mathbf{u}, p)$, utilizando o tensor de tensões.

A dinâmica de corpo rígido pode ser representada por:

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} + m\mathbf{g}$$

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}$$

onde m e $\mathbf{I}$, são a massa do corpo e sua matriz de inércia, $\mathbf{F}$ e $\mathbf{M}$ são as forças externas e torques, ambos causados pelo fluido em contato com a superfície do corpo.

Um esquema explícito de integração no tempo é aplicado para as equações acima. Para a equação de conversão de movimento, um operador de Crank-Nicholson é usado para o campo de velocidade, a fim de obter o campo de deslocamento, como segue:

$$\mathbf{v}_i^{n+1} = \mathbf{v}_i^n + \frac{\Delta t}{2m} \cdot (3\mathbf{F}_i^n - \mathbf{F}_i^{n-1})$$

$$\mathbf{u}_i^{n+1} = \mathbf{u}_i^n + \frac{\Delta t}{2} (\mathbf{v}_i^{n+1} + \mathbf{v}_i^n)$$

Para a rotação foi usada a mesma estratégia:

$$\boldsymbol{\omega}^{n+1} = \boldsymbol{\omega}^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{I}^{-1} (3\overline{\mathbf{M}}^n - \overline{\mathbf{M}}^{n-1})$$

$$\boldsymbol{\theta}^{n+1} = \boldsymbol{\theta}^n + \frac{\Delta t}{2} \boldsymbol{\omega}^{n+1}$$

- **Acoplamento das Força de interação fluido-riser**

As forças internas dos elementos finitos que representam a interação do fluido com o riser podem ser calculadas por:

$$\mathbf{f}_{\text{int}}^e = \int_{\Omega_{\text{sub}}} \mathbf{B}^t \boldsymbol{\sigma} d\Omega = \mathbf{B}^t \boldsymbol{\sigma} V^e$$

onde o tensor ($\boldsymbol{\sigma}$) foi definido na equação. (8), e $\mathbf{B}$ é o operador diferencial discreta eo volume do elemento. A integral (19) é avaliado em Ω_{sub} , a região definida por elementos finitos com os nós junto à superfície do corpo, ou seja, os elementos para os quais pelo menos um nó está no Γ_m . Assim, a força resultante sobre o corpo imerso pode ser calculado pela soma de cada contribuição vigor elemento interno (calculada como equivalente forças nodais).

Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados resultados de uma interferência entre duas linhas de risers, embora preliminares, estes resultados indicam a potencialidade do código EdgeCFD em simulações de VIV em escoamento turbulento acoplado com dinâmica de corpo rígido. Tipicamente essas linhas em águas profundas atingem comprimentos entre 1500 e 2500 m e suas seções transversais entre 20 e 30 cm de diâmetro, evidenciando assim uma relação da ordem de 1:10000, entre as escalas longitudinal e transversal. Esta relação por si só inviabiliza uma consideração de todo o domínio de análise e sugere a idealização de um submodelo do sistema água-riser-embarção. Neste sentido é de crucial importância uma correta representação das rigidezes de toda a linha nos contornos do sub-modelo computacional empregado. A duas linhas de riser analisadas estão dispostas em uma configuração do tipo tandem, onde o riser de montante está fixo e o de jusante livre para deslocar na direção transversal ao escoamento. O submodelo analisado está descomprometido, por ora, com uma real especificação da linha completa, ou seja, nos extremos do cilindro de jusante consideraram-se rigidezes infinitas na

direção do fluxo e na longitudinal e rigidez transversal nula. A figura a seguir mostra o submodelo e suas dimensões.

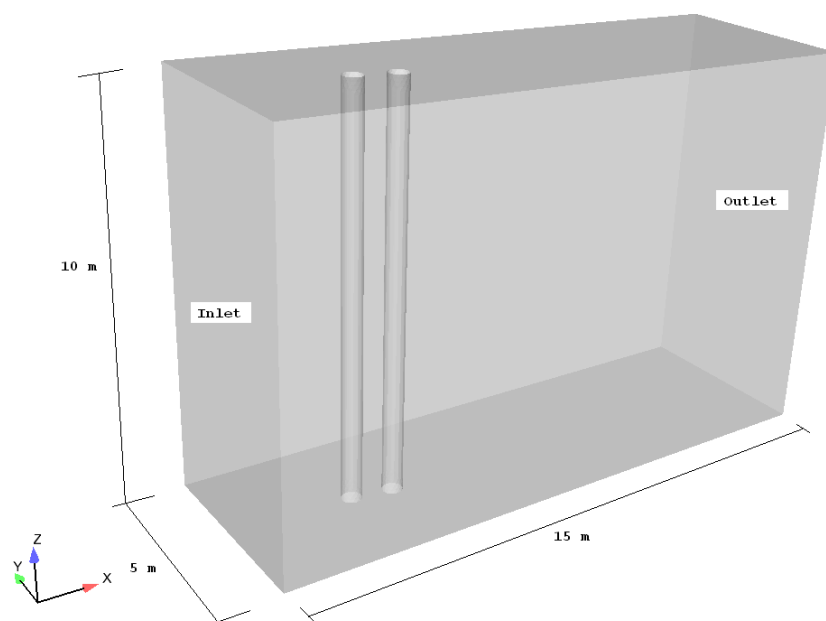


Figura.2 – modelo geométrico.

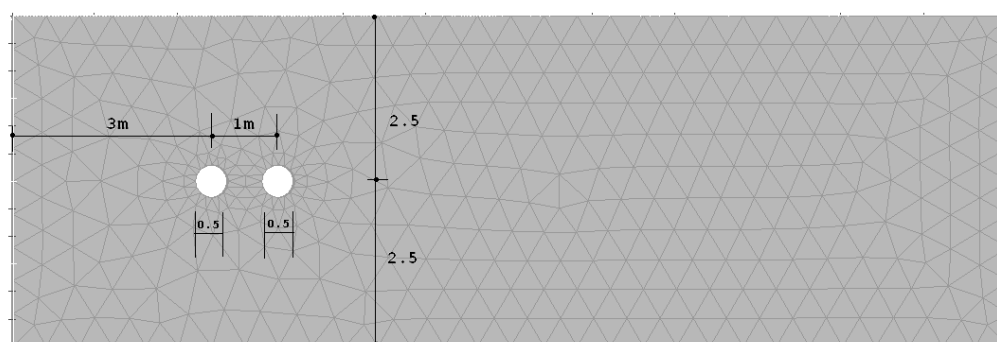


Figura.3 – modelo geométrico e malha de topo

A malha de elementos finitos tem 177623 elementos e 32154 nós, as condições de contorno para o escoamento prescrevem velocidade no inlet 1m/s, deslizantes nas paredes laterais, fundo e topo; e condição não-deslizante na parede dos cilindros. As propriedades físicas do fluido foram definidas para gerar $Re=100$. A seguir são mostrados os resultados para os campos de velocidade, pressão e deformadas da malhas.

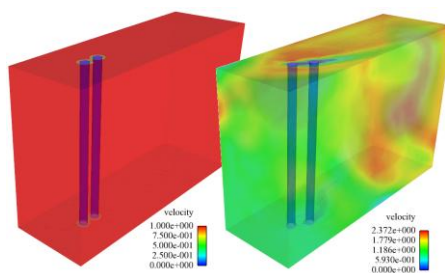


Figura.4 – Campo de velocidades e deformada em $t = 0$ e $t = 75$ s.

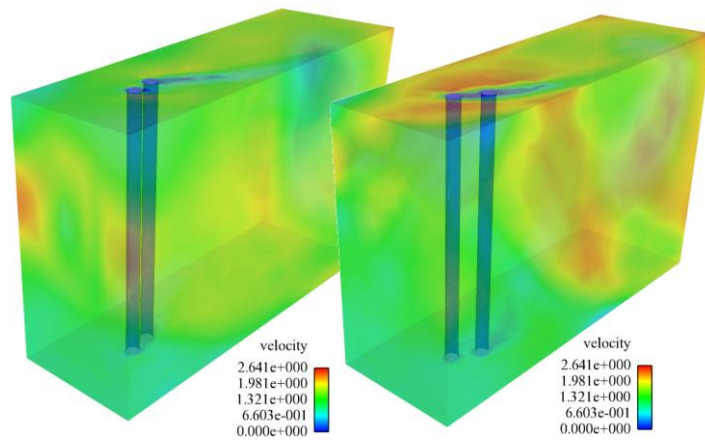


Figura 5 – Campo de velocidades e deformada em $t = 355$ s e $t = 792$ s.

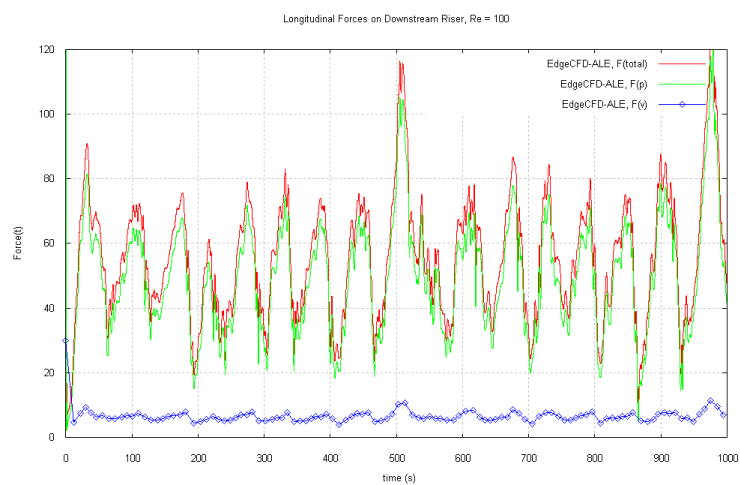


Figura.6 – História da força de arrasto total $F(\text{total})$ e suas parcelas de pressão $F(p)$ e de atrito $F(v)$, na direção longitudinal.

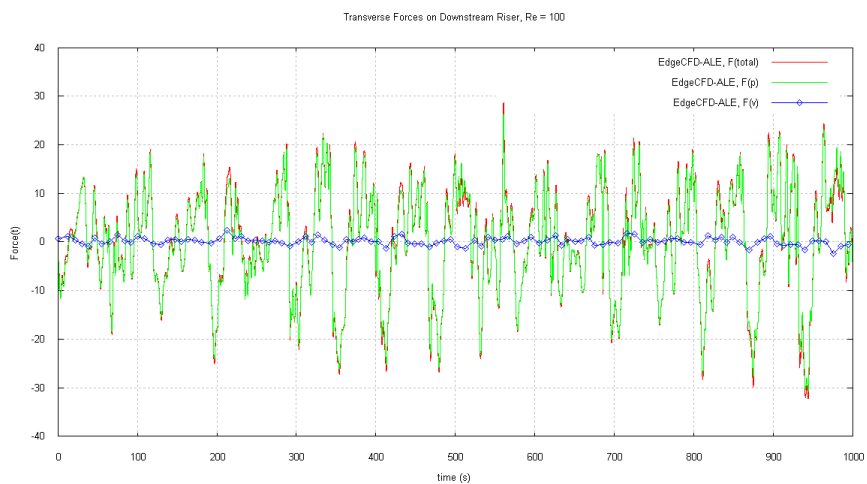


Figura 7 – História da força de arrasto total $F(\text{total})$ e suas parcelas de pressão $F(p)$ e de atrito $F(v)$, na direção transversal.

Conclusões

A partir dos resultados apresentados para esse modelo preliminar de interferência entre risers é possível concluir que as potencialidades do código podem sim avaliar a interação entre duas linhas de riser, contudo que apenas uma linha seja móvel. Neste sentido existe uma demanda imediata e vislumbra a justificativa em incluir no código EdgeCFD uma implementação para múltiplos corpos moveis cada um com sua dinâmica translacional e rotacional própria. Voltando aos resultados, a figura 2.11 indica que, em concordância com Fox and Macdonalds 1998, o arrasto de atrito é de cerca de 5% do arrasto por pressão para a faixa de $Re=100$.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da ANP Agência Nacional do Petróleo e do CENPES/PETROBRAS.

Referências Bibliográficas

- C.E. Silva, E. F. Silva, F. Quaranta, J. L. D. Alves. Using c0 triangular and quadrilateral shell elements for modeling contact-impact problems. paper: CIL12-001, XXV Cilamce, Recife-PE, 2004.
- Donea, J. Arbitrary Lagrangian Eulerian methods. In Computational Methods for Transient Analysis, volume 1 of Computational Methods in Mechanics. North-Holland, Elsevier, 1983.
- E. F. Lins, R. N. Elias, G. M. Guerra, F. A. Rochinha, A. L. G. A. Coutinho. Edge-based finite element implementation of the residual-based variational multiscale method, IJNMF, 61, 1-22, 2009.
- Elias, R.N and Coutinho, A.L.G.A, Stabilized edge-based finite element simulation of free-surface flows, Int. J. Numer. Meth. Fluids 2007; 54:965–993.
- C.E Silva, N. O. Guevara, J. L. D. Alves, Mesh updating scheme for fluid structure interaction approach, 20th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2009, Gramado-RS, Brazil.
- E. Huse, Experimental investigation of deep sea riser interaction, paper: OTC 8070, 1996.
- R. W. Fox, A. T. MacDonald, Introduction to Fluid Mechanics, Ed. John Willey & Sons, 1998.
- K. Tabri, Dynamics of ship collisions, PhD thesis, Helsinki University of Technology, 2010.
- J. Bonet, R. D. Wood, Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis, Cambridge University Press, 1997.