

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DERRAMAMENTO DE ÓLEO E ESTABILIDADE DE UM PETROLEIRO EM CASO DE AVARIA

Liang-Yee Cheng^a, Diogo Vieira Gomes^a and Kazuo Nishimoto^b

^a *Depto. Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, University of São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado Trav 2 No. 83 Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brazil, cheng.yee@poli.usp.br, <http://www.pcc.poli.usp.br>*

^b *Depto. Engenharia de Naval e Oceânica, Escola Politécnica, University of São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes No. 2231 Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brazil, knishimo@usp.br, <http://www.pnv.poli.usp.br>*

Palavras chaves: estabilidade avariada, derramamento de óleo, MPS, simulação numérica.

Resumo. Em caso de avaria de um petroleiro, tanto a estabilidade em condição avariada como a estimativa de volume de óleo derramado são de grande relevância tendo em vista à segurança da embarcação e dos tripulantes, e o impacto ambiental que poderia ser causado pelo acidente. Apesar da importância do tópico, ainda carece de ferramentas confiáveis e precisas para o estudo do fenômeno transitório do processo de derramamento deste a ocorrência da avaria. Isso porque, apesar de existirem atualmente diversos métodos para o estudo da estabilidade de embarcações, a maioria absoluta são baseados em abordagens hidrostáticas ou por aproximações quase-estáticas, que não fornecem respostas sobre o transiente do processo. Mesmo no caso de simulações baseadas em CFD (Computational Fluid Dynamics), o estudo ainda é bastante incipiente por ser um problema extremamente desafiante de interação fluido-sólido envolvendo geometrias complexas e escoamento multifásico. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos pelos autores, que realizaram simulações computacionais do derramamento de óleo e estabilidade em condição avariada levando-se em conta a os movimentos transitórios e acoplados entre os fluidos e o sólido. Para isso, um simulador baseado no método de partículas MPS (Moving particle Semi-Implicit) foi utilizado. Por ser totalmente lagrangeano, o método não utiliza malha e apresenta diversas vantagens para o estudo da hidrodinâmica não linear. O modelo de escoamento multifásico foi aperfeiçoado adotando-se um modelo de potencial de forças inter-partículas, que considera também os efeitos da molhabilidade. Como casos de estudo, por simplicidade foram utilizados modelos bidimensionais. Os resultados foram validados por meio da comparação com aqueles obtidos pelo programa de cálculo de hidrostática de embarcações SSTAB, e mostraram se bastante consistentes.

1 INTRODUÇÃO

Em caso de avaria de navios tanque, tanto a estabilidade da embarcação como o volume de óleo derramado são questões críticas dos pontos de vista de segurança e ambiental. Isso porque, de acordo com a posição da avaria do casco, calado e nível de preenchimento da carga líquida, pode ocorrer o vazamento de óleo. Como consequência, o momento de restauração, que sofre o efeito de superfície livre, poderia ser alterado pelo vazamento. Por outro lado, dependendo do volume de óleo derramado, o espalhamento da mancha de óleo pode causar desastres ambientais de grandes proporções. Dentro deste contexto, a determinação do ângulo de banda e o volume de óleo derramado são tópicos importantes no projeto e operação dos navios tanque e FPSOs.

Atualmente existem diversas ferramentas computacionais para fazer o cálculo da estabilidade avariada. Porém, devido à interação entre fluido e estrutura, complexa geometria e escoamento multifásico, a investigação detalhada do fenômeno de derramamento de óleo provocado pela avaria no casco, incluindo o movimento transiente dos fluidos e da embarcação, ainda representa um grande desafio para métodos convencionais de simulação computacional.

Sendo assim, o objetivo deste estudo é realizar uma análise acoplada do processo de derramamento de óleo e da estabilidade em caso de avaria de navio tanque ou plataformas FPSO. Para isso, o simulador baseado no método MPS (Moving particle Semi-Implicit) desenvolvido pela equipe de Tanque de Provas Numéricos da Universidade de São Paulo (TPN/USP) é utilizado para modelar o movimento transiente da embarcação e o escoamento multifásico água-óleo com superfícies livres. Vale ressaltar que o estudo do fenômeno transitório pode adquirir uma importância muito grande na medida em que reproduz as condições e quantifica o tempo crítico de resposta para contramedidas que minimizam as perdas materiais e ambientais e a salvaguarda da tripulação.

Nos estudos anteriores (Rueda et al. (2008)), os autores deste trabalho investigaram o caso da avaria do casco de um modelo bidimensional em escala reduzida, onde o líquido contido no interior do tanque é água. Com a implementação do modelo de escoamento multifásico no simulador MPS, passaram a analisar o mesmo fenômeno, porém com os tanques internos do modelo parcialmente preenchidos por óleo no início. Resultados iniciais das simulações computacionais do fenômeno transitório de derramamento de óleo em caso de avaria de um modelo de navio tanque foram apresentados no Cheng et al. (2010), onde o tanque de ensaio foi modelado com um batedor, fixo e formando uma parede vertical, de um lado e praia para absorção de ondas no outro lado. Neste trabalho, a fim de melhorar os resultados e reduzir as oscilações residuais causadas pela reflexão de ondas devido à presença da parede lateral esquerda, o tanque de ensaio foi remodelado posicionando praias para a dissipação das ondas nas duas extremidades. Além disso, foram corrigidos alguns erros nos valores dos ângulos finais de banda e volumes de óleo derramado calculados utilizando o programa SSTAB (Coelho e Nascimento, 2003), que é uma ferramenta para análise de estabilidade de sistemas flutuante com base nas teorias de hidrostática.

A seguir, faremos uma apresentação breve do método numérico, modelos e casos analisados, resultados, discussões e conclusões.

2 MÉTODO NUMÉRICO

As equações governantes do escoamento incompressível e viscoso do problema a ser analisado neste estudo são:

Equação de continuidade

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

E equação de momento

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{g} + \frac{\vec{\sigma}}{\rho} \quad (2)$$

Onde, ρ é densidade, \vec{u} é velocidade, p é pressão, ν é viscosidade cinemática, $\vec{\sigma}$ é tensão superficial e \vec{g} é a aceleração gravitacional.

Moving Particle Semi-implicit (MPS) é um método sem malha que utiliza descrição Lagrangeana, no qual o domínio espacial é discretizado em partículas, e os operadores diferenciais são obtidos a partir de um modelo de interação entre partículas baseado na função peso dado por:

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e - r}{r_e}, & (r < r_e) \\ 0, & (r > r_e) \end{cases} \quad (3)$$

Onde, r é a distância entre duas partículas e r_e é o raio efetivo, que limita a região onde a interação entre as partículas ocorre.

Considerando uma função escalar ϕ , o vetor gradiente e o Laplaciano da função na partícula i são determinados levando-se em conta os valores das partículas vizinhas j . Dentro do alcance r_e , eles são dados pelas Eq. (4) e (5), respectivamente.

$$\langle \phi \rangle_i = \frac{d}{pnd^0} \sum_{i \neq j} \left[\frac{(\phi_j - \phi_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (4)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{pnd^0 \lambda} \sum_{i \neq j} [(\phi_j - \phi_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (5)$$

Onde, d é o número das dimensões espaciais e pnd é o número de densidade de partícula. Na Eq. (5), λ é calculado por:

$$\lambda = \frac{\sum_{i \neq j} |\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2 w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)}{\sum_{i \neq j} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)} \quad (6)$$

Número de densidade de partícula (pnd) é proporcional à densidade do fluido e é dado por:

$$pnd = \sum_{i \neq j} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (7)$$

e pnd^0 é o valor inicial do pnd .

O método MPS adota um algoritmo semi-implícito. Exceto o termo de gradiente de pressão, os termos do lado direito da Eq. (2) são calculados explicitamente para estimar velocidade e posição. Em seguida, a equação Poisson de pressão é resolvido de forma implícita para o

instante $(t + \Delta t)$. A equação Poisson de pressão é dado por:

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{t+\Delta t} = - \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{pnd_i^* - pnd^0}{pnd^0} \quad (8)$$

Onde, pnd^* é o número de densidade de partícula calculado usando a posição estimada das partículas na parte explícita do algoritmo. pnd^* é mantido igual a pnd^0 para assegurar a condição de incompressibilidade.

O termo do lado esquerdo da Eq. (8) pode ser discretizado usando o modelo do Laplaciano, isto é, Eq. (5), constituindo assim, um sistema de equações.

Para o presente estudo bi-dimensional, r_e foi estabelecido como $2,1 l_0$ para calcular o gradiente de pressão e o número de densidade de partículas, onde l_0 é a distância inicial entre partículas. r_e de $4,0 l_0$ foi utilizado para calcular o operador laplaciano.

Quando o número de densidade de partícula é menor que $\beta \cdot pnd$, a partícula é considerada como uma partícula de superfície livre. Aplicando a condição dinâmica da superfície livre, a pressão de todas as partículas que satisfazem este critério é imposta como zero. De acordo com Koshizuka and Oka (1996), β pode variar entre 0,80 e 0,99.

Para calcular a tensão superficial $\bar{\sigma}$ na superfície livre e na interface água-óleo, o modelo de força potencial entre partículas proposto por Kondo et al. (2007) é adotado. O modelo também pode levar em conta a molhabilidade da interface sólido-fluidos.

Tradicionalmente, fileiras de diferentes tipos de partículas são usadas para descrever a geometria de uma parede rígida no MPS. A pressão é calculada na primeira fileira em contato com fluido. As fileiras de partículas que não tem contato com os fluidos são formadas por partículas *dummy*, que são utilizadas para garantir o cálculo correto do número de densidade de partícula, mas no qual o cálculo de pressão não é necessário.

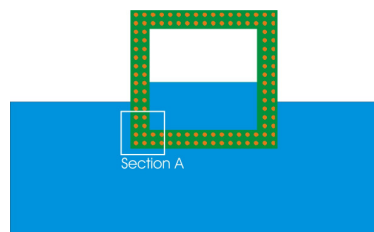


Figura 1: Modelando o casco com tanque interno.

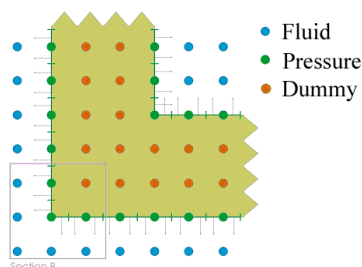


Figura 2: Seção A – Fileiras de partículas de pressão e *dummy* que definem o casco com tanque interno.

No caso de um corpo flutuante com tanques internos, como o cálculo de pressão na superfície do casco não deve ser afetado pelos valores de pressão dentro do casco, e vice-versa, para r_e igual a $2,1$, é necessário colocar pelo menos duas fileiras de partículas *dummy* entre as

fileiras de partículas de pressão que definem a geometria do casco e a geometria dos tanques internos, conforme mostram Fig. 1 e Fig. 2.

Força e momento atuante no casco são calculados integrando-se a pressão em lados externos e internos do corpo. A área elementar da parede é definido como a meia distância entre as partículas do casco e um dos seus vizinhos. Cada área tem seu vetor normal orientado para o lado do fluido. Fig. 3 mostra um exemplo das partículas do casco, suas áreas elementares e a direção dos vetores normais.

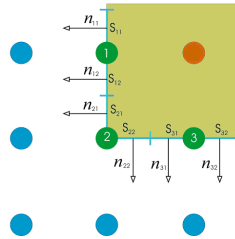


Figura 3: Seção B – Área elementar e o vetor normal.

As forças e o momento aplicado no centro de gravidade do casco são dados por:

$$F = \sum_i P_i \cdot (S_{i1} \cdot \vec{n}_{i1} + S_{i2} \cdot \vec{n}_{i2})$$

$$M = \sum_i P_i \cdot (S_{i1} \cdot \vec{n}_{i1} + S_{i2} \cdot \vec{n}_{i2}) \times (\vec{r}_i - \vec{r}_{CG}). \quad (9)$$

Onde, S_{i1} e S_{i2} são as duas áreas elementares da partícula i ; P_i é a pressão da partícula i ; \vec{n}_{i1} e \vec{n}_{i2} são vetores normais de S_{i1} e S_{i2} , respectivamente; \vec{r}_i é o vetor posição da partícula i e \vec{r}_{CG} é o vetor posição do centro de gravidade do corpo flutuante.

Com a força e momento calculado pela Eq. (9), a dinâmica do flutuante pode ser obtido por:

$$m \frac{d^2 \vec{r}_{CG}}{dt^2} = F \quad e$$

$$I \frac{d^2 \vec{\theta}}{dt^2} = M \quad . \quad (10)$$

Onde, m e I são massa e inércia do corpo rígido, respectivamente, θ é o ângulo de *roll*.

3 CASOS DE ESTUDO

A fim de simular o vazamento do óleo logo após sofrer avaria, foi utilizado um modelo 2D cujas propriedades principais são descritas na Tabela 1.

Boca (m)	0,415
Pontal (m)	0,325
Massa (kg/m)	20,30
Inércia (Kgm ² /m)	0,657
TCG (m)	0,0
VCG (m)	0,1097

Tabela 1: As propriedades principais do casco.

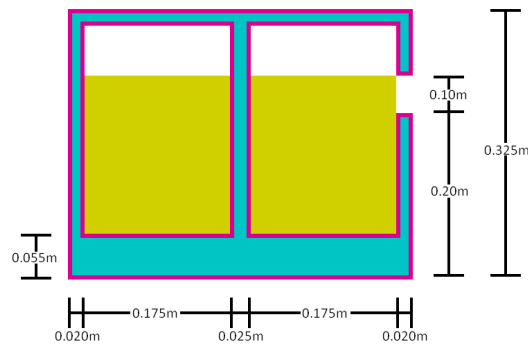


Figura 4: Dimensões do modelo.

O Comprimento do tanque usado na simulação numérica é 2,7 m, incluindo uma praia de 0,8m em cada lado. Conforme mencionado acima, a aplicação das praias para a dissipação das ondas tem como objetivo evitar a reflexão das ondas gerados pelo fenômeno dinâmico e aprimorar os resultados em relação aqueles apresentados no Cheng et al. (2010). A inclinação das praias é de aproximadamente 30°. Quadrados de 3x3 partículas foram fixados na proximidade das praias. A profundidade do tanque usado nas simulações é 0,40 m, conforme mostra a Fig. 5.

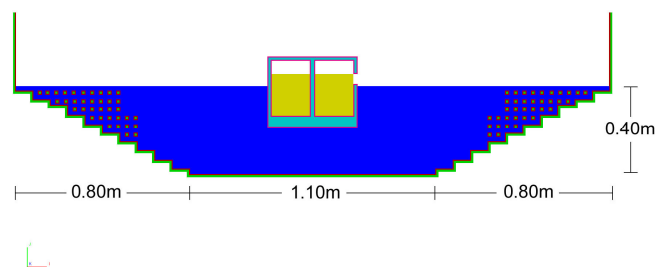


Figura 5: Dimensões do tanque.

A Tabela 2 mostra casos analisados no presente estudo. Três posições diferentes da avaria e dois níveis de preenchimento dos tanques foram considerados. As propriedades da água e do óleo são dadas na Tabela 3.

Denominação dos casos	Preenchimento (%)	Altura da avaria (m)
BO_75%_020	75	0,20
BO_75%_014	75	0,14
BO_75%_010	75	0,10
BO_45%_014	45	0,14
BO_45%_010	45	0,10

Tabela 2: Casos estudados.

Propriedade	Água	Óleo
Densidade (kg/m ³)	1000,0	900,0
Viscosidade (m ² /s)	1,0x10 ⁻⁶	5,0x10 ⁻⁵
Coefficiente de tensão superficial (N/m)	0,072	0,026

Tabela 3: Propriedades da água e do óleo.

As simulações foram executadas adotando distância entre partículas de 5mm e *time step* de 0,0005s e tempo de simulação de 10s. Um caso típico possui no total em torno de 30000 partículas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

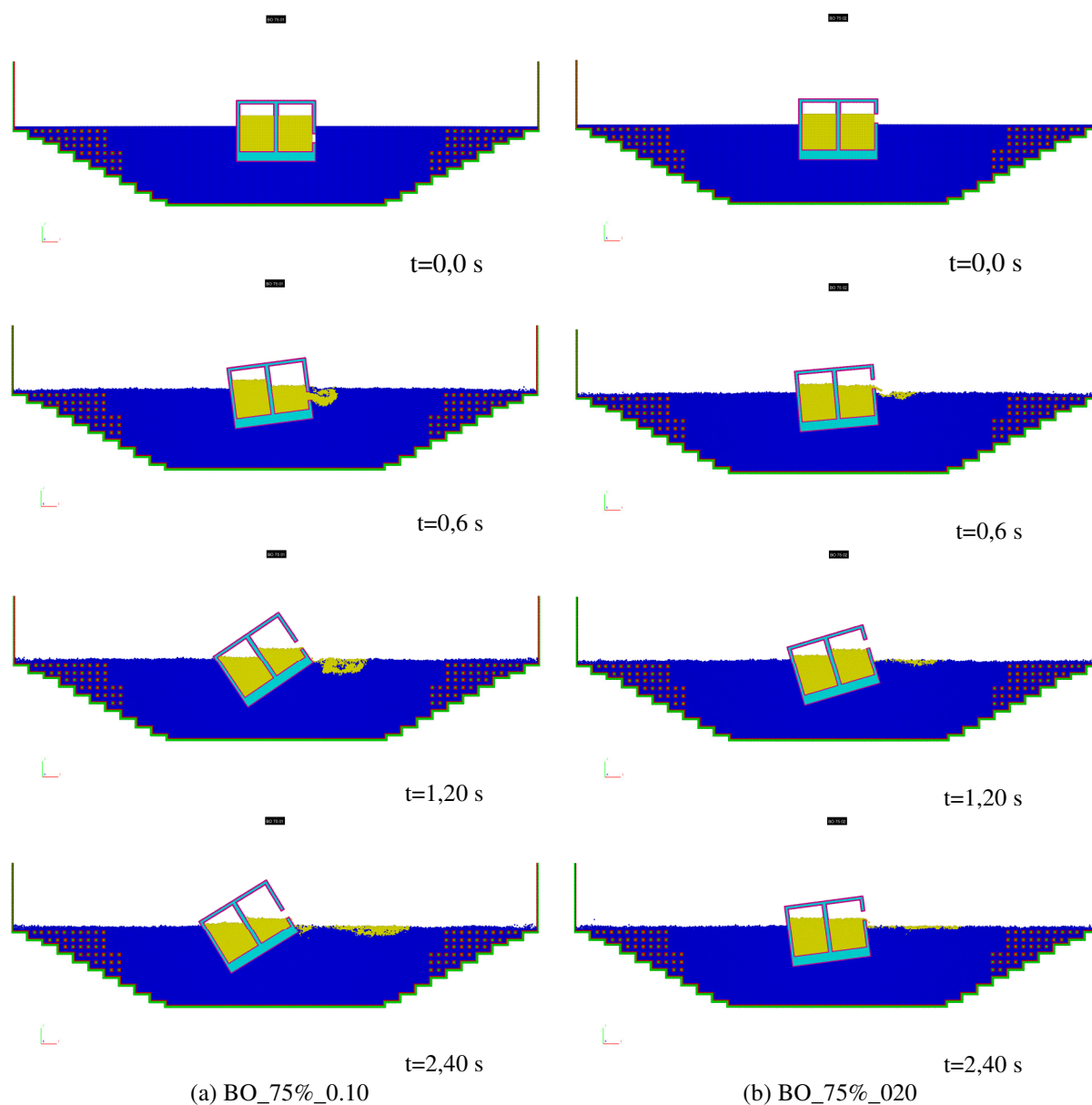


Figura 6: Snapshots da simulação dos casos BO_75%_010 (a) e BO_75%_020 (b).

A Figura 6(a) apresenta os snapshots das animações obtidas da simulação com nível de preenchimento de 75% e altura de avaria a 0,10m acima da quilha. A simulação do fenômeno transitório mostra que ao lado do movimento de *roll* do casco, pequeno movimento de *drift* induzido pelo vazamento ocorre no começo do processo quando um volume relativamente grande de óleo é liberado.

A Figura 6(b) fornece os snapshots do caso BO_75%_020, isto é, com 75% de preenchimento e avaria a altura de 0,20m acima da quilha. Como a altura da abertura é próxima à superfície livre do óleo dentro do tanque, o volume de óleo derramado é

relativamente pequeno, assim como o movimento do casco. Devido a menor perturbação do fluido em torno do casco, o óleo derramado aparentemente espalha-se com mais facilidade e forma um filme fino sobre a superfície de água. Além disso, o movimento de *drift* observado na Figura 6(a) é praticamente imperceptível na Figura 6(b).

A validação do ângulo final de banda foi realizada usando o programa SSTAB. SSTAB é o programa padrão para a análise de estabilidade dos sistemas flutuantes adotado pela Petrobras, e utiliza a teoria de hidrostática para calcular a estabilidade com ou sem efeitos de superfície. Apesar do SSTAB ser capaz de estimar o ângulo final de banda e o volume de óleo derramado por meio da abordagem quase-estática, ele é incapaz de levar em conta os efeitos dinâmicos, que podem ser relevantes em alguns casos. Sendo assim, o ângulo de banda final obtido pelo SSTAB foi calculado usando o volume determinado pela simulação por MPS.

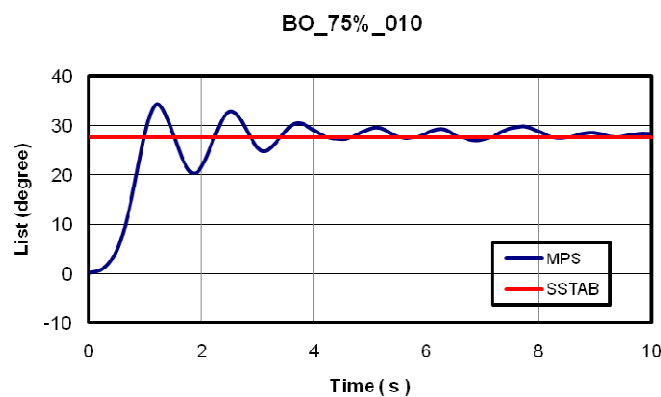


Figura 7: Série temporal dos ângulos de banda obtidos pela análise transitória do MPS e pela análise hidrostática do SSTAB para tanque interno com preenchimento de 75% e alturas das aberturas de 0,10m.

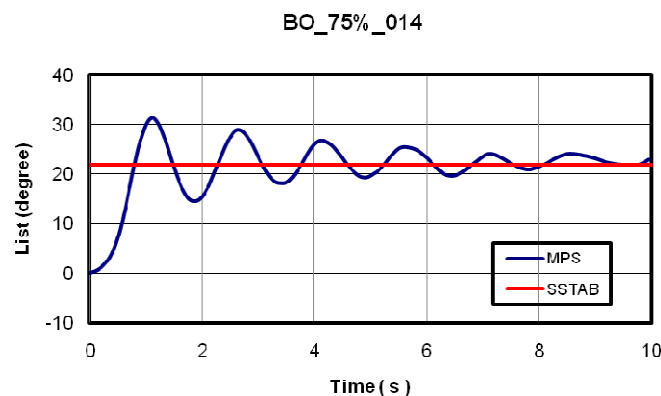


Figura 8: Série temporal dos ângulos de banda obtidos pela análise transitória do MPS e pela análise hidrostática do SSTAB para tanque interno com preenchimento de 75% e alturas das aberturas de 0,14m.

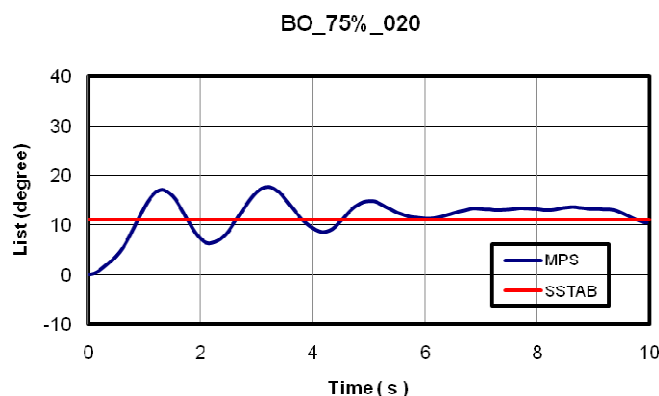


Figura 9: Série temporal dos ângulos de banda obtidos pela análise transitória do MPS e pela análise hidrostática do SSTAB para tanque interno com preenchimento de 75% e alturas das aberturas de 0,20m.

As Figuras 7, 8 e 9 mostram as séries temporais dos movimentos de *roll* obtidos pela simulação por MPS e o ângulo final de banda obtido pelo SSTAB para os casos BO_75%_010, BO_75%_014 e BO_75%_020, respectivamente. Os movimentos transitórios calculados pelo MPS mostram oscilações do movimento depois de um rápido adernamento a partir da posição inicial, que vão sendo amortecidos. Este amortecimento mostra a eficácia das praias posicionadas nas duas extremidades, que absorveram bem as ondas geradas no transiente. Isso representa um melhoramento significativo sobre os resultados dos mesmos autores (Cheng et al. 2010), que utilizaram a praia em apenas um das extremidades. As oscilações convergem para um valor médio que concorda muito bem com os ângulos de banda final obtidos pelo SSTAB nos casos com altura de abertura de 0,10m e 0,14m. Quando a altura da abertura é 0,20m, o valor médio do MPS é um pouco maior que do SSTAB. Vale ressaltar que os valores de ângulo de banda obtidos por SSTAB são ligeiramente menores que os apresentados por Cheng et al. (2010) por causa de uma correção feita no valor de VCG dos tanques.

Uma comparação entre o snapshot do ângulo de banda obtido pelo MPS a 10,0s e a saída gráfica do SSTAB no caso BO_75%_014 é mostrada na Fig.10. As imagens indicam que os ângulos e volumes de óleo dentro de tanques internos são bem próximos, assim com os calados obtidos pelo MPS e SSTAB. Com base nas estimativas obtidas usando as imagens, o erro médio do volume da água deslocada reduziu de consideravelmente, caindo para em torno de 3% a 5%, devido ao aprimoramento introduzido neste trabalho.

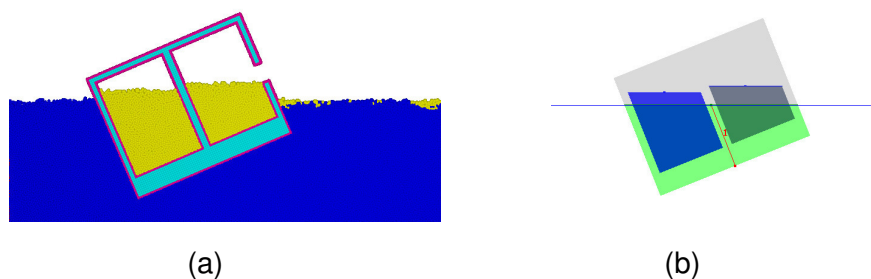


Figura 10: Comparação entre o ângulo de banda final obtido pelo MPS (a) e pelo SSTAB (b) para o caso BO_75%_014 (75% preenchimento e altura de abertura de 0,14m).

A Figura 11 mostra a comparação entre o ângulo final de banda obtido pelo MPS e pelo

SSTAB para preenchimento de 45% e 75% para alturas das aberturas de 0,10 m, 0,14 m e 0,20 m. A comparação mostra que o ângulo obtido pelo MPS é relativamente próximo ao do SSTAB. As discrepâncias entre os ângulos finais são mínimas quando o preenchimento é 75%, e aumentam quando o nível de preenchimento diminui para 45%. Este comportamento parece estar relacionado à discretização especial adotada no MPS: quando a abertura fica mais alta, a quantidade de partículas de óleo liberadas dos tanques internos reduz drasticamente e poderia ser necessária uma resolução maior para modelar o pequeno volume de óleo derramado e os seus efeitos com precisão.

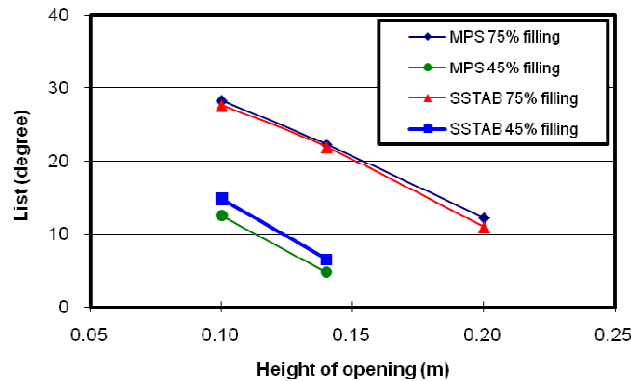


Figura 11: Comparação dos ângulos de banda obtidos pelos MPS e pelo SSTAB para preenchimentos de 45% e 75% e alturas de abertura de 0,10m, 0,14m e 0,20m.

Os volumes de óleo derramado calculados pelo MPS são mostrados na Fig. 12 juntamente com os volumes calculados pela abordagem quase-estática. O eixo vertical da Fig. 12 é o volume de óleo derramado em relação ao volume total do tanque interno. A comparação mostra uma boa concordância entre os resultados. Apesar dos efeitos dinâmicos de *drift* e *roll*, as discrepâncias são relativamente pequenas. Ao mesmo tempo, pode-se notar que as discrepâncias são menores e tornam-se quase desprezíveis à medida que a altura da abertura aumenta, já que o volume derramado diminui e o fenômeno se aproxima cada vez mais do processo quase-estático.

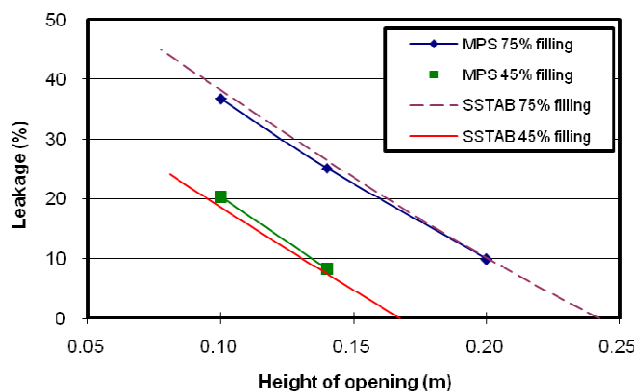


Figura 12: Comparação dos volumes de óleo derramado obtidos pelos MPS e pela abordagem quase-estática com SSTAB para preenchimentos de 45% e 75% e alturas de abertura de 0,10m, 0,14m e 0,20m.

Visando ilustrar o fenômeno transitório, as relações entre o ângulo máximo de adernamento e a altura da abertura são mostradas na Fig. 13. O ângulo máximo de adernamento considerado aqui é a inclinação máxima registrada no movimento transitório de

roll. Da figura, é possível constatar a linearidade das relações em situações onde a posição da abertura é relativamente alta, quando o volume de óleo derramado é pequeno. No entanto, o resultado do caso 75%_010 mostra que a relação linear deixa de existir à medida que o processo se afasta do processo quase-estático.

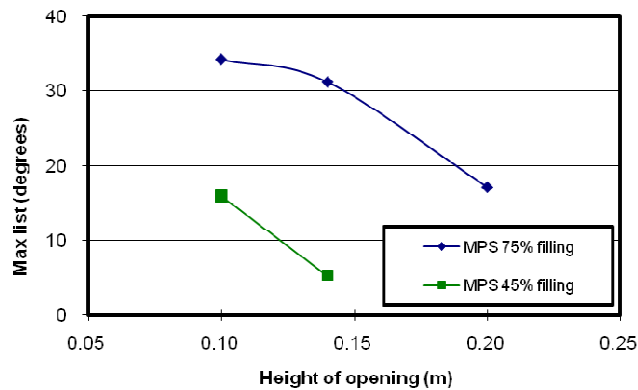


Figura 13: Comparação dos ângulos máximo de banda obtidos pelos MPS para preenchimentos de 45% e 75% e alturas de abertura de 0,10m, 0,14m e 0,20m.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo investigamos a dinâmica do derramamento de óleo e estabilidade em caso de avaria de um navio tanque. As simulações numéricas baseadas no MPS permitiram levar em conta os movimentos acoplados entre o casco avariado e o escoamento multifásico.

As simulações numéricas dos movimentos transitórios mostram que o movimento *drift* induzidos pelo escape de óleo pode ocorrer no início do processo quando um volume relativamente grande de óleo é liberado. Da comparação dos ângulos de banda final com aqueles obtidos pelo programa SSTAB, que é baseado na teoria de hidrostática, fica claro que as discrepâncias entre os resultados dos dois são relativamente pequenas. Ao mesmo tempo, as discrepâncias tornam-se praticamente desprezíveis quando a posição da abertura é relativamente alta, levando a reduzido volume de óleo derramado e fenômeno muito próximo ao quase-estático.

Por fim, vale ressaltar que embora a simulação completa do espalhamento de óleo não é realizada aqui porque a formação de um filme fino de óleo requer um nível maior de refinamento e, portanto, um número maior de partículas, que está fora do escopo deste estudo, os volumes de óleo derramados foi computado com precisão relativamente boa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cheng, L. Y., Gomes, D. V., Nishimoto, K. A numerical study on oil leakage and damaged stability of oil carriers. In: *The Proceedings of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic (OMAE'2010)*, Jun. 2010, Shanghai, China. Paper No. OMAE2010-20827.

Coelho, L.C.G., Nascimento, A.A. – SSTAB User's Manual, PUC, Tecgraf, (2003).

Koshizuka, S. and Oka, Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Science and Engineering*, 123:421–434, (1996).

Kondo, M., Koshizuka, S., Takimoto, M. Surface tension model using inter-particle

potential force in Moving Particle Semi-implicit method. *Transactions of JSCEs*, paper No. 20070021, (2007).

Silva, G. E. R., Tsukamoto, M., M., Medeiros, H. F., Cheng, L. Y., Nishimoto, K., SAAD, A. C. Validation study of MPS (Moving Particle Semi-implicit Method) for sloshing & damage stability analysis. In: *The Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic (OMAE'2008)*, Jun. 2008, Estoril, Portugal. Paper No. OMAE2008-57460.