



## ESTUDO NUMÉRICO DA HIDRODINÂMICA DE ANTEPARAS INCLINADAS E PERFURADAS PARA A PROTEÇÃO DO IMPACTO DE ONDAS

**Rubens Augusto Amaro Junior**

**Liang-Yee Cheng**

[rubens.amaro@usp.br](mailto:rubens.amaro@usp.br)

[cheng.yee@usp.br](mailto:cheng.yee@usp.br)

Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2 no. 83, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil.

**Stella Vieira Rosa**

[stella.rosa@usp.br](mailto:stella.rosa@usp.br)

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo.

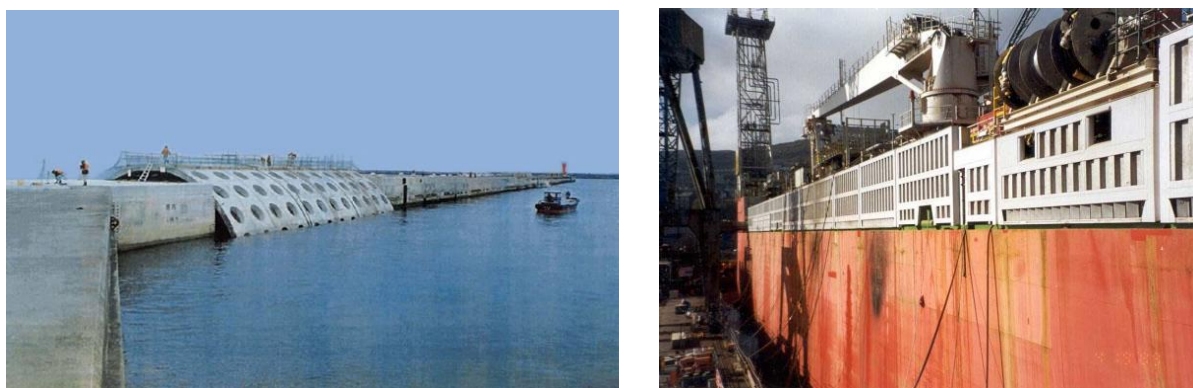
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508-030, São Paulo, SP, Brasil.

**Resumo.** *Esforços provocados pelo impacto de ondas são ameaças à segurança e operação de estruturas costeiras e oceânicas e, com isso, diversos dispositivos de proteção têm sido desenvolvidos. Dentre as formas de proteção existentes, estruturas no formato de anteparas verticais, em V, inclinadas ou perfuradas são utilizadas devido à sua praticidade e eficiência. Com o objetivo de investigar o desempenho das anteparas inclinadas e perfuradas na proteção de estruturas costeiras e oceânicas, um método lagrangeano de simulação baseado em partículas, denominado Moving Particle Simulation (MPS), é utilizado neste trabalho para modelar e simular o fenômeno hidrodinâmico transiente e impulsivo. A antepara de proteção é modelada como uma parede retangular inclinada e perfurada por furos circulares, e a região a ser protegida é modelada como uma parede retangular vertical. Valores de força, momento e impulso na antepara e parede protegida são analisados para verificar os efeitos da quantidade e dimensão dos furos (porosidade) e inclinação da antepara em relação a vertical, na mitigação dos esforços provocados pelo impacto da onda.*

**Palavras-chave:** *Anteparas perfuradas, Anteparas inclinadas, Impacto de ondas, Moving Particle Simulation, Método de partículas.*

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os esforços ambientais que atuam sobre estruturas costeiras e oceânicas, forças de onda são de grande importância por questões estruturais e operacionais. Para mitigação dos impactos de ondas, diversos dispositivos de proteção (*breakwaters*) têm sido utilizados. No caso de estruturas flutuantes, como por exemplo FLNG (*Floating Liquefied Natural Gas*) ou VLFS (*Very Large Floating Structure*), é comum existirem restrições no peso dos dispositivos de proteção, levando ao uso de dispositivos mais leves, como proteções do tipo Vane ou placas perfuradas (BUCHENER ET AL., 2003; VARYANI ET AL, 2005). Como as proteções perfuradas exigem menos materiais e induzem uma dissipação significativa de energia de onda, são opções de grande interesse para a proteção de estruturas costeiras, tais como proteções semicirculares perfuradas (DHINAKARAN, 2011). A Figura 1 apresenta exemplos de proteções perfuradas para estruturas costeira e oceânica. No entanto, o projeto dessas proteções, considerando as condições de onda e carregamentos toleráveis das instalações protegidas ou equipamentos das estruturas costeiras ou oceânicas, continua sendo um grande desafio. Além disso, são encontrados poucos trabalhos sobre os desempenhos destes dispositivos, bem como as influências de seus parâmetros geométricos, devido à complexidade dos aparatos experimentais e à limitação dos métodos tradicionais de CFD (*Computer Fluid Dynamics*), baseados no uso de malha para a modelagem de fenômenos hidrodinâmicos altamente não-lineares.



**Figura 1. Proteções para estruturas costeira (DHINAKARAN, 2011) e oceânica (EXXON MOBIL, 2000).**

O objetivo desta pesquisa é investigar o desempenho de anteparas inclinadas e perfuradas na proteção de estruturas costeiras e oceânicas para mitigação dos esforços. No trabalho anterior dos autores (AMARO JR., ET AL., 2015), os efeitos da geometria e porosidade das anteparas foram investigados. No presente trabalho, o foco do estudo é o efeito da inclinação das anteparas. Na pesquisa, um método lagrangeano de simulação baseado em partículas, denominado *Moving Particle Simulation* (MPS), é utilizado para modelar e simular o fenômeno hidrodinâmico transiente e impulsivo, com superfícies livres envolvendo fragmentação e junção de fluido. A anteparas de proteção é modelada como uma parede retangular com furos circulares e inclinada com diferentes ângulos em relação a vertical e a região a ser protegida é modelada como uma parede retangular vertical. Por simplicidade, a onda incidente é aproximada por uma coluna d'água sujeita a ação da gravidade e efeitos de ar aprisionado são desconsiderados. Valores de força, momento e impulso na anteparas e parede protegida são analisados para verificar os efeitos da quantidade e dimensão dos furos (porosidade) e inclinação da anteparas com a vertical, na mitigação dos esforços provocados pelo impacto da onda.

## 2 MÉTODO NUMÉRICO

As equações governantes para escoamentos incompressíveis são representadas pela lei da conservação de massa e do momento:

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

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}, \quad (2)$$

onde  $\rho$  é a massa específica,  $v$  a velocidade,  $P$  a pressão,  $\nu$  a viscosidade cinemática,  $f$  a força externa por unidade de massa e  $t$  o tempo.

No método MPS, originalmente proposto por Koshizuka et al. (1996), todos os termos das equações governantes, representados por operadores diferenciais, são substituídos por operadores diferenciais discretos para uma distribuição irregular de pontos. Para cada partícula  $i$ , a influência de uma partícula vizinha  $j$  é definida pela função peso  $\omega_{ij}$ , obtida por:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} \frac{r_e}{r_{ij}} - 1 & \|\vec{r}_{ij}\| \leq r_e \\ 0 & \|\vec{r}_{ij}\| > r_e \end{cases}, \quad (3)$$

onde  $r_e$  é o raio efetivo, que estabelece quais partículas  $j$  devem ser consideradas no cálculo das grandezas físicas da partícula  $i$ , e  $r_{ij}$  é a distância entre as partículas  $i$  e  $j$ .

Para cada partícula  $i$ , a somatória dos pesos de todas as partículas vizinhas  $j$ , é definida como a densidade do número de partículas  $n_i$ :

$$n_i = \sum_{j \neq i} \omega_{ij}. \quad (4)$$

Desta forma, para uma função escalar  $\phi$ , os operadores gradiente e laplaciano são definidos pelas Eqs. (5) e (6), respectivamente:

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n_{\max}^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\phi_j - \phi_i)}{\|\vec{r}_{ij}\|^2} \vec{r}_{ij} \omega_{ij}, \quad (5)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n_{\max}^0} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) \omega_{ij}, \quad (6)$$

onde  $d$  é a dimensão espacial,  $n_{\max}^0$  é o valor inicial máximo de  $n_i$  e  $\lambda$  é um parâmetro de correção, que faz o ajuste do crescimento da variância e pode ser calculado como:

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} \|\vec{r}_{ij}\|^2 \omega_{ij}}{\sum_{j \neq i} \omega_{ij}}. \quad (7)$$

Para o escoamento incompressível, um algoritmo semi-implícito é utilizado no método MPS. Inicialmente, velocidade e posição são calculadas explicitamente, considerando os termos de viscosidade e força externa da equação de conservação do momento, Eq. (2). Após

os cálculos da parte explícita, a pressão de todas as partículas é calculada pela equação de Poisson para a pressão:

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{t+\Delta t} - \alpha \frac{\rho}{\Delta t^2} P_i^{t+\Delta t} = -\gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n_i^* - n_{\max}^0}{n_{\max}^0}, \quad (8)$$

onde  $n_i^*$  é a densidade do número de partículas calculada após os deslocamentos das partículas na fase explícita,  $\alpha$  é o coeficiente de compressibilidade artificial e  $\gamma$  é o coeficiente de relaxação. Os coeficientes  $\alpha$  e  $\gamma$  são utilizados para melhorar a estabilidade do método computacional. Além disso, o gradiente de pressão também é modificado para melhora da estabilidade do MPS (KOSHIZUKA ET AL., 1996):

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n_{\max}^0} \sum_{j \neq i} \frac{(P_j - \hat{P}_i)}{\|\vec{r}_{ij}\|^2} \vec{r}_{ij} \omega_{ij}, \quad (9)$$

onde  $\hat{P}_i$  é a pressão mínima entre os vizinhos da partícula  $i$ , garantindo exclusivamente forças de repulsão e evitando sobreposição entre partículas.

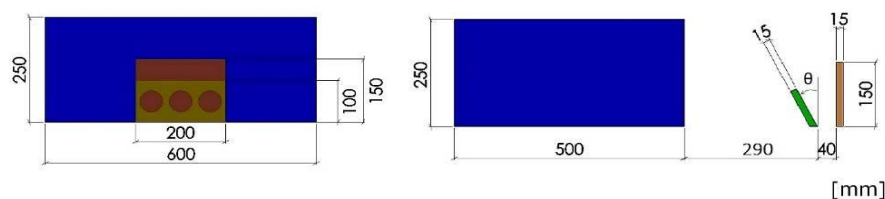
Por fim, a velocidade das partículas é atualizada, considerando somente o termo do gradiente de pressão, e a nova posição das partículas é obtida.

A identificação das partículas de superfície livre é feita com base no número de densidade de partículas. Uma partícula é definida como partícula de superfície livre e sua pressão igualada a zero, quando seu número de densidade de partículas  $n_i$  é menor do que  $\beta n_i$ , onde  $\beta$  é um valor entre 0 e 1.

As paredes sólidas são representadas por três camadas de partículas fixas. As partículas em contato com fluido são denominadas partículas de parede, com suas pressões calculadas pela equação de Poisson para a pressão, Eq. (8), juntamente com as partículas de fluido. As partículas que formam as outras duas camadas são denominadas partículas *dummy*. As partículas *dummy* são utilizadas para garantir o cálculo correto do número de densidade de partículas nas partículas de parede, não sendo calculada a pressão destas partículas.

### 3 CASOS ESTUDADOS

Os casos estudados são semelhantes ao modelo de *dam-break*, em que uma coluna d'água fica sujeita à ação da gravidade e livre para escoar e se chocar com qualquer obstrução. A anteparo de proteção é modelada como uma parede retangular perfurada por furos circulares e inclinada com diferentes ângulos em relação a vertical. A região a ser protegida é modelada como uma parede retangular vertical. Para verificar os efeitos da quantidade e dimensão dos furos (porosidade) e inclinação da anteparo com a vertical, na mitigação dos esforços gerados pelo impacto da onda, valores de força, momento e impulso na anteparo e parede protegida são analisados. A Figura 2 apresenta as principais dimensões do modelo analisado.



**Figura 2. Dimensões do problema de *dam-break* para anteparas inclinadas.**

Para todas as simulações, foi adotada uma altura de onda  $H_{onda} = 0.111$  m, e altura de coluna d'água ( $H_{dam}$ ) fornecida pela equação (BUCHNER, 2002):

$$H_{dam} = \frac{9}{4} H_{onda} = \frac{9}{4} 0.111 = 0.25m. \tag{10}$$

Os ângulos de inclinação ( $\theta$ ) selecionados para a antepara de proteção foram de 0, 10 e 30 graus, em relação à vertical. A Figura 3 apresenta as disposições dos furos na antepara de proteção, com altura igual a  $100/\cos\theta$ , mantendo a altura efetiva de 100 mm, independente da inclinação. Diâmetros dos furos e porosidades da antepara são apresentados na Tabela 1.

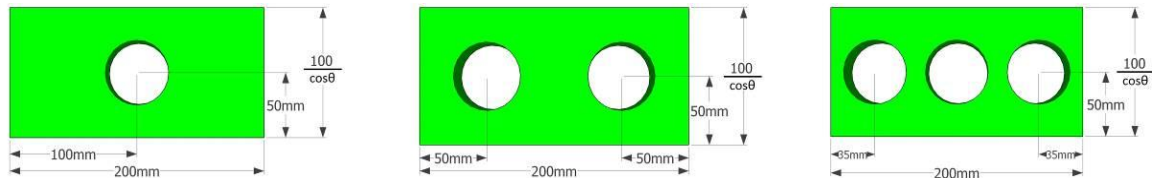


Figura 3. Disposições de furos na antepara de proteção.

Tabela 1. Diâmetros dos furos e porosidades.

N° de furos	0	1						2						3		
Diâm. do furo (mm)	-	30	40	50	60	70	80	30	40	50	60	70	80	30	40	50
Porosidade (%)	0	3.53	6.28	9.82	14.14	19.24	25.13	7.06	12.56	19.64	28.28	38.48	50.16	10.59	18.84	29.46

Parâmetros de simulação e propriedades do fluido, utilizados em todas as simulações, são apresentados na Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente. As resoluções espaciais e temporais ( $l_0$  e  $\Delta t$ ) utilizadas neste trabalho foram fundamentadas no estudo de convergência realizado previamente pelos autores (AMARO JR., ET AL., 2015).

Tabela 2. Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Passo de tempo ( $\Delta t$ )	0.0005 s
Distância entre partículas ( $l_0$ )	0.0025 m
Raio de vizinhança ( $r_e$ )	$2.1l_0$
Tempo de simulação ( $t$ )	2.5 s
Superfície livre ( $\beta$ )	0.85
Coefficiente de relaxação ( $\gamma$ )	0.10
Fator de compressibilidade ( $\alpha$ )	$10^{-8}$ ms <sup>2</sup> /kg

Tabela 3. Propriedades do fluido.

Propriedade	Valor
Densidade ( $\rho$ )	1001 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade cinemática ( $\nu$ )	$10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s

### 3.1 Resultados e parâmetros adimensionais

Para remover a dependência dimensional dos resultados numéricos, valores adimensionais de forças, momentos e impulsos foram analisados. O coeficiente de força ( $C_F$ ), obtido considerando força inercial do escoamento, é dado por:

$$C_F = \frac{\|\vec{F}\|}{\rho V^2 A}, \quad (11)$$

onde  $F$  é a força na antepara ou parede protegida,  $V$  é a velocidade da coluna d'água aproximada por  $V = \sqrt{2gH_{dam}}$  e  $A$  é a área da antepara de proteção inclinada de 0 grau. O coeficiente de momento ( $C_M$ ) é obtido considerando a força inercial multiplicada pelo comprimento característico, representado pela altura efetiva da antepara de proteção  $H_{pd} = 100$  mm:

$$C_M = \frac{\|\vec{M}\|}{\rho V^2 A H_{pd}}. \quad (12)$$

O coeficiente de impulso ( $C_I$ ) é obtido considerando a força inercial multiplicada pelo tempo de simulação  $t$ :

$$C_I = \frac{\|\vec{I}\|}{\rho V^2 A t}. \quad (13)$$

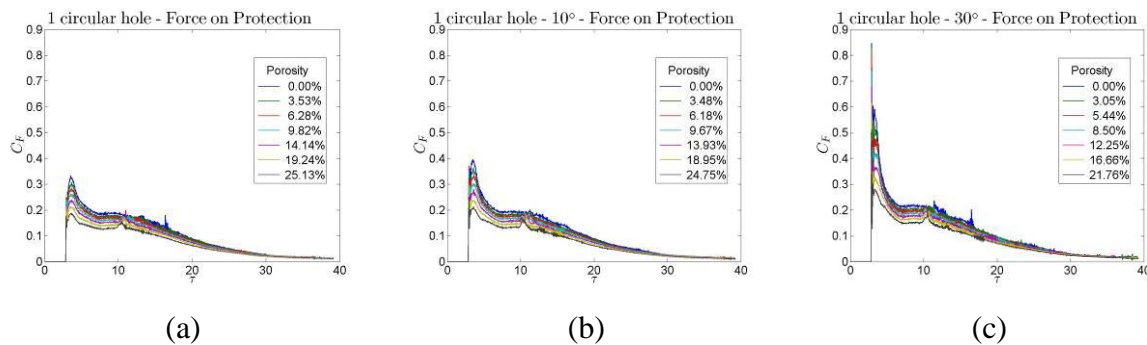
Como os resultados analisados variam em função do tempo, é conveniente a utilização de um tempo adimensional ( $\tau$ ), obtido por:

$$\tau = t \frac{\sqrt{gH_{dam}}}{H_{pd}}, \quad (14)$$

onde  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup> é a aceleração da gravidade.

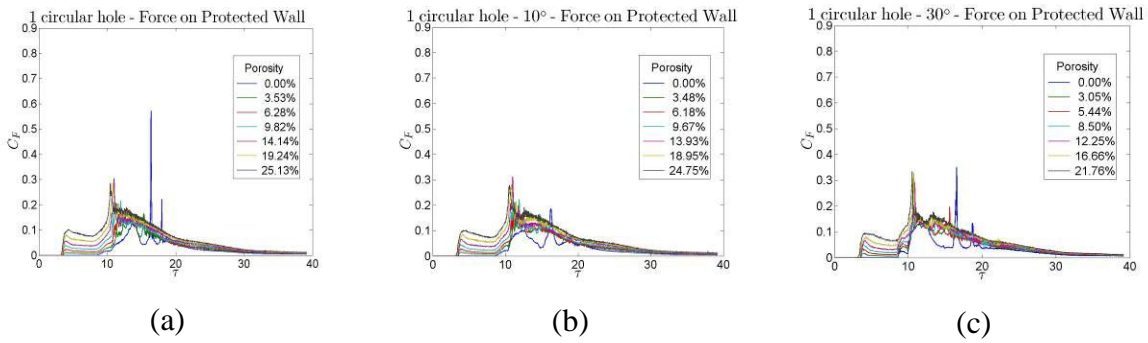
### 3.2 Antepara com 1 furo

Resultados de forças e momentos são analisados para casos com anteparas com um furo posicionado no seu centro geométrico, com diâmetros de 30, 40, 50, 60, 70 e 80 mm, e inclinações de 0, 10 e 30 graus. Resultados de anteparas sem furo também são apresentados.



**Figura 4. Força nas anteparas de proteção com um furo. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).**

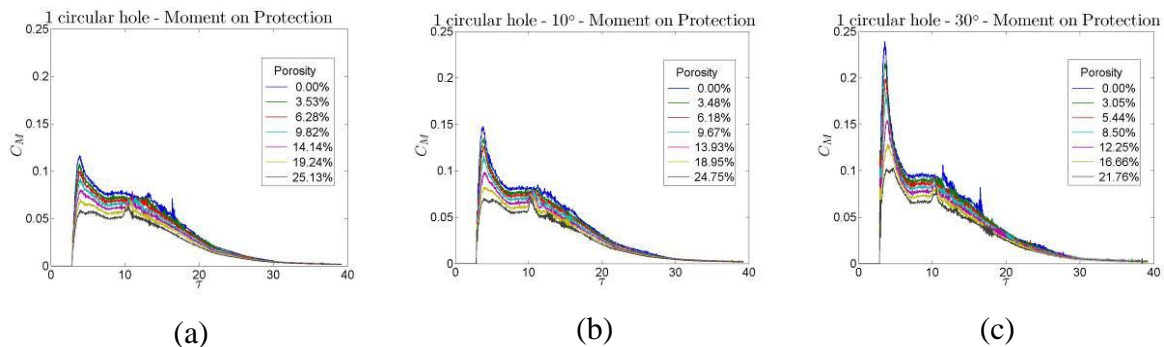




**Figura 5. Força nas paredes protegidas para anteparas de proteção com um furo. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).**

Os gráficos de forças nas anteparas (*Protection*) e nas paredes protegidas (*Protected Wall*), considerando apenas os esforços hidrodinâmicos exercidos na face frontal, são apresentados na Figura 4 e Figura 5, respectivamente. As figuras mostram que, à medida que se aumentam as dimensões do furo (porosidade), os valores de força diminuem na anteparas e aumentam na parede protegida, com pequenas exceções em que ocorrem oscilações de força nos instantes de maior impacto. Isso mostra que o aumento da seção do furo permite uma maior passagem de água, o que resulta em valores maiores de forças na parede protegida, e que os efeitos da porosidade são significativos apenas nos momentos iniciais do encontro da onda com as anteparas, normalmente mais críticos do ponto de vista estrutural.

Quanto à inclinação, observa-se que quanto mais inclinada é a anteparas, maior é a magnitude dos picos de força na mesma. Esse aumento dos picos de forças pode ser visualizado claramente nos valores de  $C_F = 0.85$ , aproximadamente, no instante  $\tau = 3$  para inclinação de 30 graus, muito superior aos valores obtidos para inclinações de 0 grau e 10 graus. Apesar do aumento nos picos de força na anteparas de proteção, a força na parede protegida não apresenta redução com o aumento da inclinação. Para o caso de anteparas vertical, inclinação de 0 grau, nota-se um pico elevado de força, de aproximadamente  $C_F = 0.58$ , na parede protegida para anteparas sem furo, e que pode ser altamente indesejado para o projeto da estrutura protegida.



**Figura 6. Momento nas anteparas de proteção com um furo. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).**

A Figura 6 apresenta os momentos nas anteparas de proteção com um furo circular, considerando apenas os esforços atuantes na face frontal. Observa-se que conforme a porosidade aumenta, os valores de momento na anteparas diminuem, com pequenas exceções em que ocorrem oscilações de momento em instantes de maior impacto. Quanto aos efeitos da inclinação, observa-se padrão semelhante ao de forças, onde anteparas com maior inclinação apresentam maiores picos de momento.

### 3.3 Anteparas com 2 furos

Para as anteparas com dois furos circulares posicionados na metade da altura da anteparas e distantes de 0.1 m, os furos tiveram seus diâmetros variados de 30, 40, 50, 60, 70 e 80 mm, e as inclinações das anteparas variadas de 0, 10 e 30 graus. Novamente são considerados os resultados de anteparas sem furo.

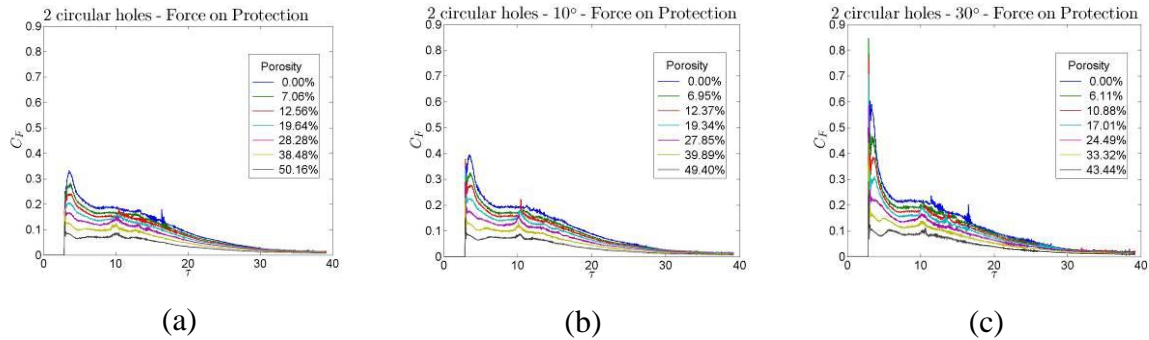


Figura 7. Força nas anteparas de proteção com dois furos. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).

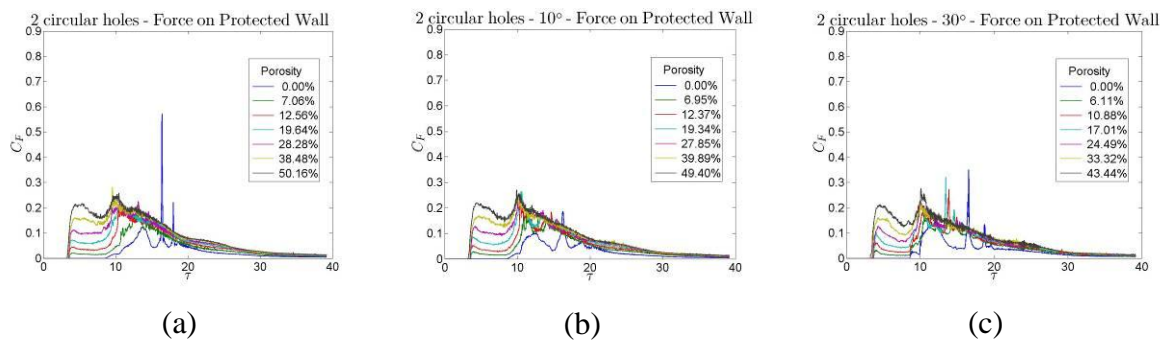


Figura 8. Força nas paredes protegidas para anteparas de proteção com dois furos. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).

Nos casos de anteparas com dois furos, nota-se novamente que, à medida que a porosidade da anteparas aumenta, os valores de força na anteparas diminuem, enquanto que os valores de força na parede protegida aumentam, como pode ser observado na Figura 7 e Figura 8. Em relação à inclinação, novamente observa-se que o seu aumento provoca um aumento nos picos de força na mesma. Com o aumento da inclinação da anteparas, nota-se uma queda mais acentuada das forças na parede protegida, nos instantes iniciais, entre  $\tau = 0.5$  e  $\tau = 0.9$ .

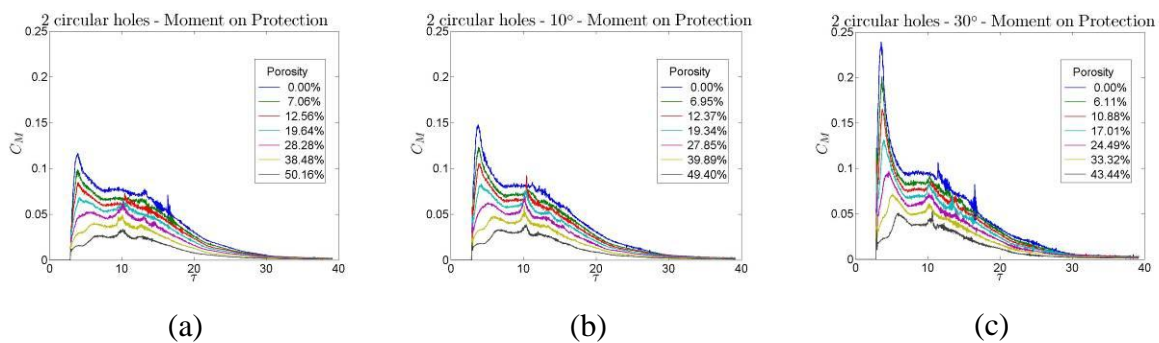


Figura 9. Momento nas anteparas de proteção com dois furos. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).



A Figura 9 apresenta os momentos nas anteparas com dois furos circulares. Assim como nos casos com um furo, nota-se que conforme a porosidade aumenta, os valores de momento na anteparagem diminuem. Quanto à inclinação, padrão semelhante aos casos de um furo é obtido.

### 3.4 Anteparagem com 3 furos

Nesse item é considerada uma anteparagem com três furos circulares posicionados na metade da altura da anteparagem, sendo um deles central e os demais laterais e distantes de 0.065 m. Os furos tiveram seus diâmetros variados com valores de 30, 40 e 50 mm. O diâmetro máximo dos furos é menor neste caso por causa da limitação na largura da anteparagem de proteção. Inclinações de 0, 10 e 30 graus também foram analisadas. A Figura 10 e Figura 11 apresentam as forças nas anteparagens de proteção com três furos e paredes protegidas, respectivamente.

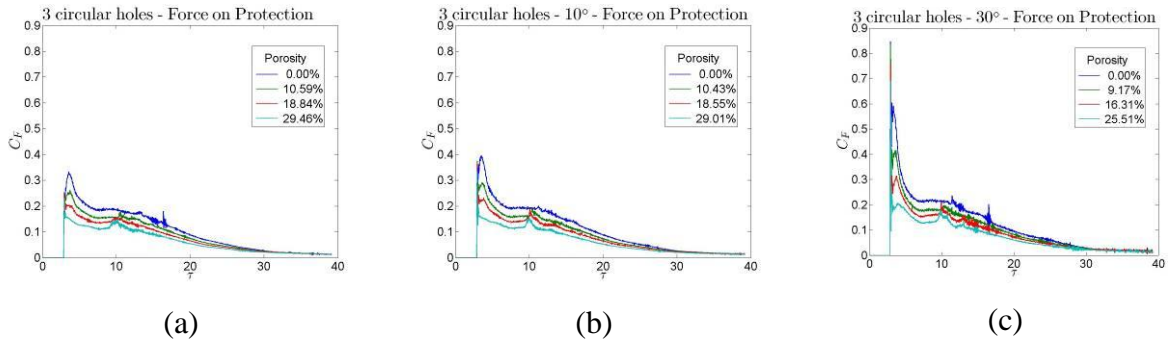


Figura 10. Força nas anteparagens de proteção com três furos. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).

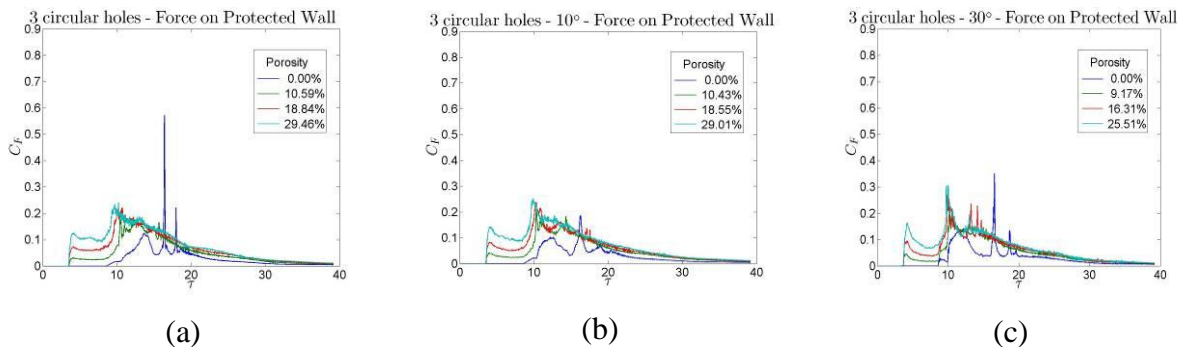


Figura 11. Força nas paredes protegidas para anteparagens de proteção com três furos. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).

Assim como nos casos de anteparagens com um ou dois furos, nota-se novamente para os casos com anteparagens com três furos que, à medida que a porosidade da anteparagem aumenta, os valores de força na anteparagem diminuem, enquanto que os valores de força na parede protegida aumentam. Em relação à inclinação, novamente observa-se que o aumento da inclinação aumenta os picos de força na anteparagem de proteção. Para piorar, observou-se que o aumento da inclinação contribui para uma elevação dos picos de força na parede protegida, nos instantes iniciais próximo de  $\tau = 0.3$ . Novamente, são observadas quedas mais acentuadas das forças nas paredes protegidas, entre os instantes  $\tau = 0.3$  e  $\tau = 0.5$ , à medida que se aumenta o ângulo de inclinação. Oscilações de força na parede protegida são observadas para os casos com inclinação de 30 graus e porosidades de 16.31% e 25.51%, nos instantes próximos de  $\tau = 13$ .

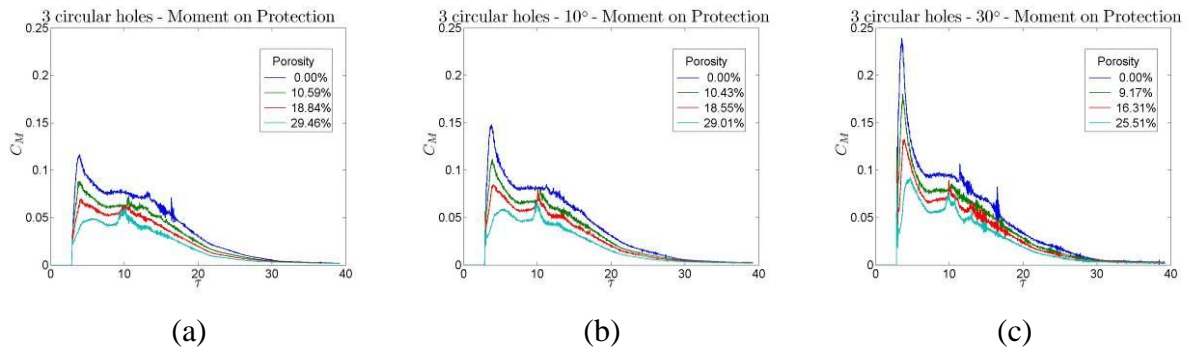


Figura 12. Momento nas anteparas de proteção com três furos. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).

A Figura 12 apresenta os momentos nas anteparas com três furos circulares. Assim como nos casos com um e dois furos, nota-se que conforme o diâmetro do furo aumenta, os valores de momento na antepará diminuem. Quanto à inclinação, observa-se padrão semelhante aos casos de um e dois furos, em que anteparas com maior inclinação geram um aumento nos picos de momento.

### 3.5 Impulso nas anteparas e paredes protegidas

Para um entendimento melhor das características geométricas das anteparas, foi analisado o coeficiente de impulso em função da porosidade da antepará. Através dos resultados de forças e momentos, observa-se que o movimento do fluido atenua após  $\tau = 30$  ( $t = 1.9$  s), aproximadamente. Dessa forma, o impulso ( $I$ ) foi calculado numericamente entre os instantes  $t_0 = 0$  s e  $t_F = 2.5$  s, como:

$$\vec{I} = \sum_{t_0}^{t_F} \vec{F} \cdot t. \quad (15)$$

A Figura 13 apresenta os valores de impulso na antepará de proteção em função da porosidade da antepará.

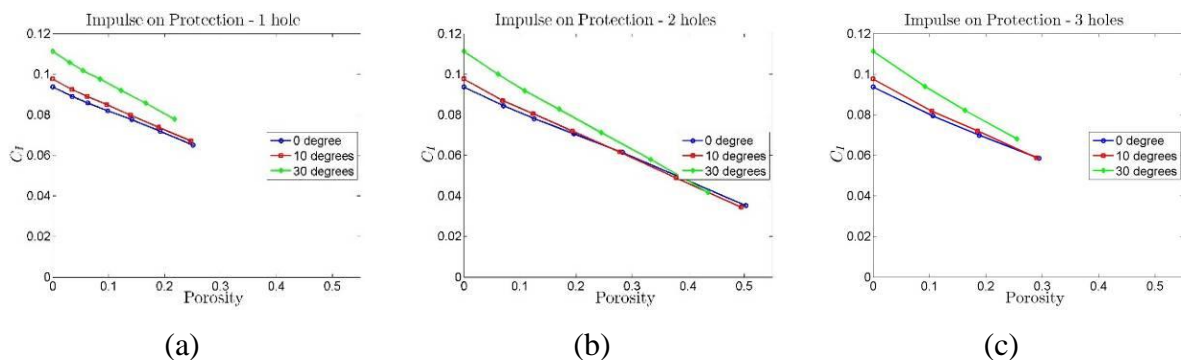
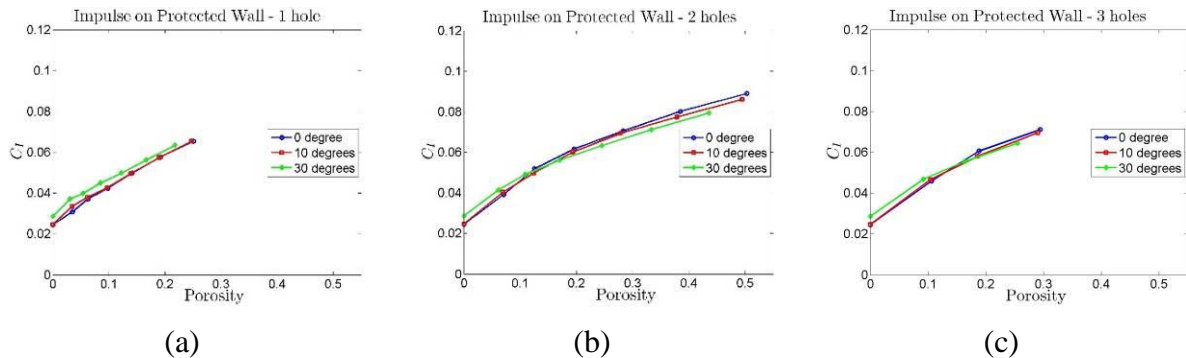


Figura 13. Impulso nas anteparas de proteção com um furo (a), dois furos (b) e três furos (c).

Os gráficos de impulso sobre a antepará de proteção apresentam uma tendência linear para todos os casos analisados. Para os casos com porosidade abaixo de 0.3, anteparas com inclinação de 30 graus apresentam os valores mais altos de impulso e anteparas com inclinações de 0 grau e 10 graus apresentam valores quase sobrepostos, com valores um pouco mais altos para 10 graus. Para os casos com dois furos e porosidade acima de 0.3, anteparas com inclinações de 0 grau e 10 graus apresentam valores praticamente sobrepostos,

com valores um pouco mais altos para inclinação de 0 grau. À medida que a porosidade aumenta, anteparas com inclinação de 30 graus apresentam uma tendência a valores mais baixos de impulso do que anteparas com inclinações de 0 grau e 10 graus.



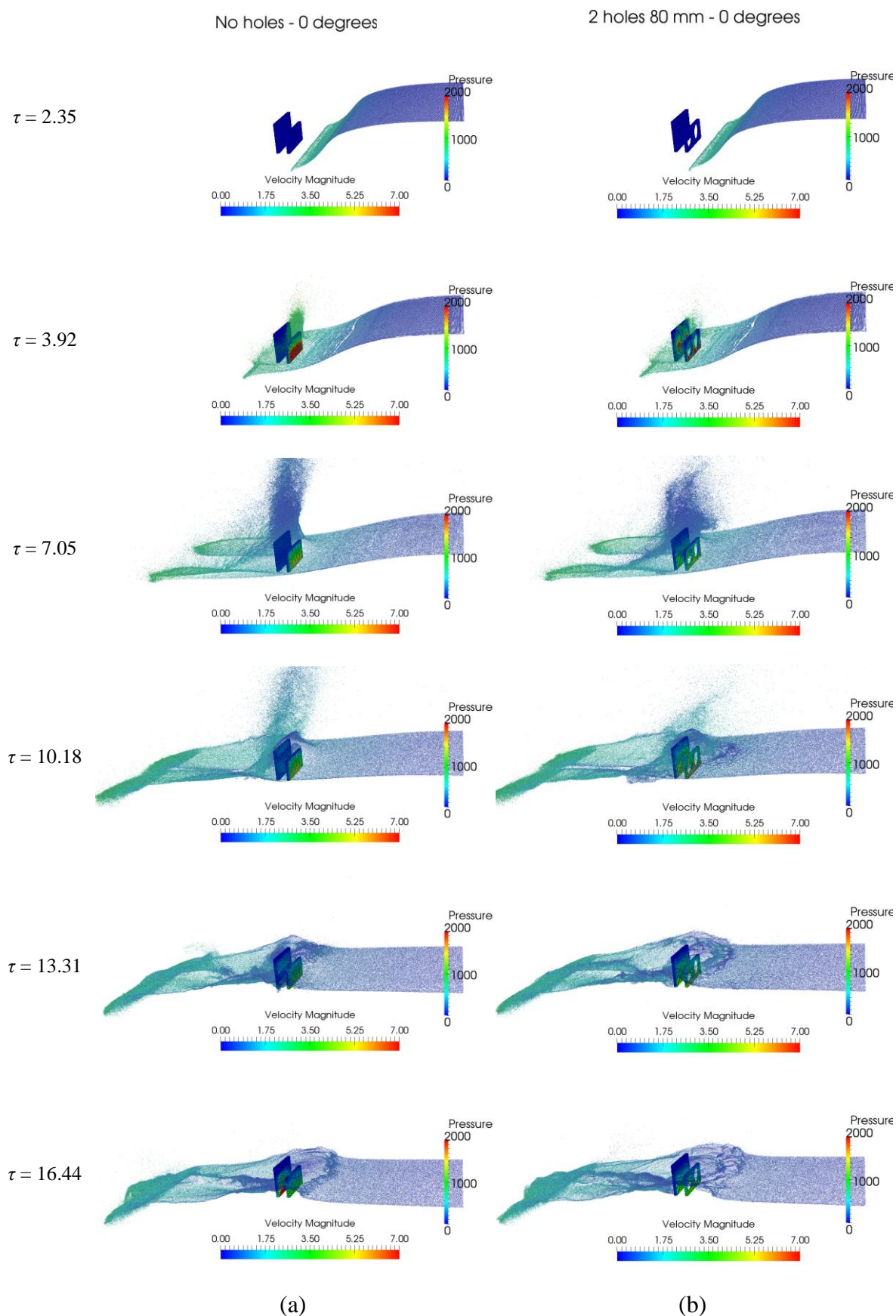
**Figura 14. Impulso nas paredes protegidas. Anteparas com um furo (a), dois furos (b) e três furos (c).**

A Figura 14 apresenta os valores de impulso na parede protegida em função da porosidade da anteparas de proteção. O impulso apresenta uma tendência levemente encurvada para os casos com dois e três furos, o que pode indicar uma não linearidade no fenômeno, devido à interferência entre os escoamentos em torno de anteparas de múltiplos furos. Para os casos com um furo, os valores apresentam uma tendência praticamente linear, com valores de impulso mais altos para inclinação de 30 graus em relação às inclinações de 0 grau e 10 graus, que apresentam valores praticamente sobrepostos. Para os casos com dois e três furos, os valores de impulso estão praticamente sobrepostos, independente da inclinação da anteparas, com uma tendência de valores mais baixos para inclinação de 30 graus e porosidade acima de 16 %.

## 4 COMPARAÇÃO ENTRE CASOS

Para uma compreensão melhor do fenômeno, seqüências de imagens de alguns casos foram comparadas, mostrando o campo de pressão na anteparas de proteção e parede protegida e a magnitude da velocidade na superfície livre do fluido.

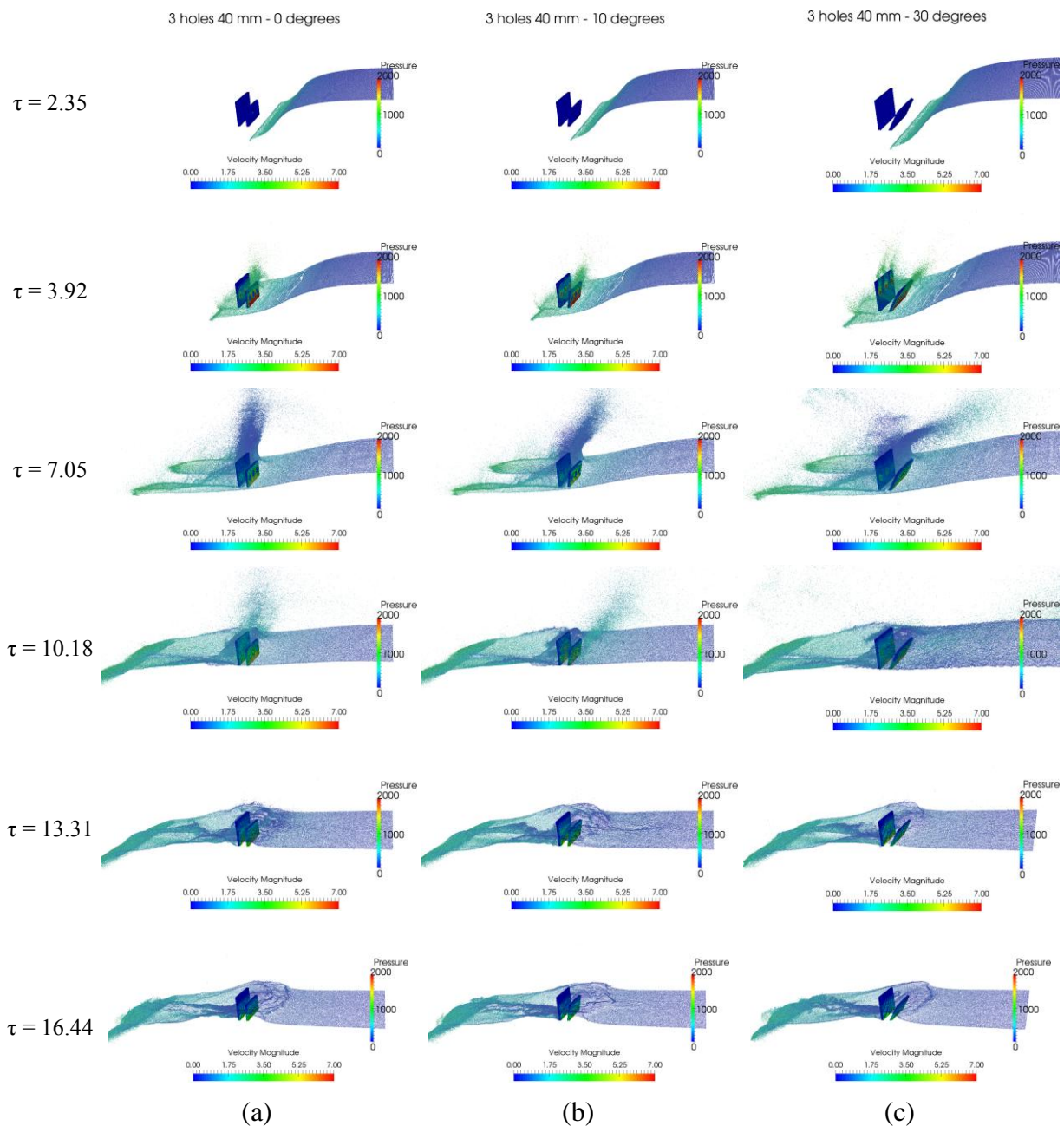
A Figura 15 mostra instantes de simulação entre  $\tau = 2.35$  e  $\tau = 16.44$ , para dois casos com anteparas vertical: sem furo e com dois furos de 80 mm de diâmetro. O fluido atinge a anteparas em  $\tau = 3.92$ , dispersando-se para o topo e as laterais da anteparas sem furo, enquanto uma parcela considerável do fluido atravessa a anteparas perfurada. Em  $\tau = 7.05$ , uma parcela do fluido é lançada para cima na anteparas sem furo, enquanto que uma parcela de fluido que atravessa os furos da anteparas perfurada atinge a parede protegida. A partir do instante  $\tau = 10.18$ , o volume de fluido que havia sido lançado para cima, volta na região entre a anteparas de proteção e a parede protegida, com aumento de pressão na parede protegida pela anteparas sem furo. No instante  $\tau = 13.31$ , uma parcela do fluido ainda passa sobre a anteparas sem furo, diferente do caso com anteparas perfurada, com fluido passando pelos furos. O fluido apresenta um comportamento mais calmo a partir do instante  $\tau = 16.44$ .



**Figura 15. Comparação entre os casos com antepara vertical sem furo (a) e com dois furos de 80 mm (b).**



A Figura 16 mostra alguns instantes de simulação para os casos com três furos de 40 mm de diâmetro e inclinações de 0, 10 e 30 graus em relação a vertical, entre os instantes  $\tau = 2.35$  e  $\tau = 16.44$ . Novamente, o fluido atinge a anteparo no instante  $\tau = 3.92$  e dispersa-se para o topo e as laterais da anteparo. Em  $\tau = 7.05$ , uma parcela do fluido é lançada verticalmente para o caso com anteparo inclinado de 0 grau, enquanto que, para os casos com anteparos inclinados de 10 graus e 30 graus, o fluido é lançado de volta, no sentido da coluna d'água. A partir do instante  $\tau = 10.18$ , o volume de fluido que havia sido lançado para cima, volta na região entre a anteparo de proteção e a parede protegida, nos casos de 0 grau e 10 graus, enquanto que o fluido lançado já se encontra na base do modelo, no caso de 30 graus. No instante  $\tau = 13.31$ , uma parcela do fluido ainda passa sobre as anteparos, colidindo com a parede protegida. Assim como nos casos anteriores, o fluido apresenta um comportamento mais calmo a partir do instante  $\tau = 16.44$ .



**Figura 16. Comparação entre os casos com anteparo com 3 furos de 40 mm. Inclinação em relação a vertical de 0 grau (a), 10 graus (b) e 30 graus (c).**



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi realizado o estudo numérico dos efeitos da quantidade e dimensão dos furos (porosidade) e inclinação de uma antepara, na mitigação dos esforços provocados pelo impacto da onda sobre uma parede vertical. O método lagrangeano de simulação baseado em partículas, *Moving Particle Simulation* (MPS), foi utilizado para modelar e simular o fenômeno hidrodinâmico transiente e impulsivo com superfícies livres, envolvendo fragmentação e junção de fluido. A antepara de proteção foi modelada como uma parede retangular com furos circulares e inclinada com diferentes ângulos em relação a vertical e a região a ser protegida foi modelada como uma parede retangular vertical. Por simplicidade, a onda incidente foi aproximada por uma coluna d'água sujeita a ação da gravidade. Efeitos de ar aprisionado foram desconsiderados. Valores de força, momento e impulso na antepara e parede protegida, foram analisados para verificar o desempenho das anteparas na mitigação dos esforços provocados pelo impacto da onda. Em todos os casos estudados, o comportamento das curvas de força ou momento em relação ao diâmetro do furo apresentou um mesmo padrão. O aumento de diâmetro dos furos levou à diminuição dos valores de força ou momento na antepara de proteção, enquanto que os valores de força na parede protegida aumentaram. Em relação às diferentes inclinações, notou-se que, quanto mais inclinada é a antepara em direção contrária à do movimento da onda, maior a magnitude dos picos de força na mesma. Apesar do aumento nos picos de força na antepara de proteção, a força na parede protegida não apresentou redução com o aumento da inclinação. Os valores de impulso sobre as anteparas de proteção apresentaram uma tendência linear. De forma geral, anteparas com inclinações de 0 grau e 10 graus apresentaram valores quase sobrepostos, enquanto que anteparas com inclinação de 30 graus apresentaram valores de impulso mais altos. Para porosidades acima de 0.3, anteparas com inclinação de 30 graus apresentaram uma tendência a valores mais baixos de impulso do que anteparas com inclinações de 0 grau e 10 graus. O impulso na parede protegida apresentou uma tendência levemente encurvada para os casos com dois e três furos e uma tendência linear para os casos com um furo. Valores praticamente sobrepostos foram observados para inclinações de 0 grau e 10 graus. Com exceção dos casos com um furo, onde anteparas com inclinação de 30 graus apresentaram valores de impulso mais altos, notou-se uma tendência de valores mais baixos para os casos com dois e três furos com inclinação de 30 graus e porosidade acima de 0.16.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pela concessão da bolsa de Doutorado para o pós-graduando Rubens Augusto Amaro Junior, a FAPESP pela concessão da bolsa de Iniciação Científica a graduanda Stella Vieira Rosa e a Petrobras S.A. pelo suporte financeiro no desenvolvimento do simulador de hidrodinâmica não linear baseado no método MPS.

## REFERÊNCIAS

- Amaro Jr. R. A., Cheng, L. Y. & Nishimoto, K., 2015. The influence of geometrical parameters on the performance of perforated breakwater. In *Proceedings of 1st Pan-American Congress on Computational Mechanics (PANACM 2015)*, pp. 1053-1064.
- Buchner, B., 2002. *Green Water on Ship-type Offshore Structures*. PhD thesis Delft University of Technology.

- Buchner, B. & Garcia, J. L. -C., 2003. Design aspects of green water loading on FPSOs. In *Proceedings of OMAE03, 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
- Dhinakaran, G., 2011. Hydrodynamic Characteristics of Semi-circular Breakwaters: Review Article. *Asian Journal of Applied Sciences*, vol. 4, n. 1, pp. 1-21.
- Exxon Mobil, 2000. [www.npd.no/engelsk/safety/greenwater/chapt\\_2.pdf](http://www.npd.no/engelsk/safety/greenwater/chapt_2.pdf)
- Koshizuka, S. & Oka, Y., 1996. Moving-Particle Semi-Implicit Method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Science and Engineering*, vol. 123, pp. 421-434.
- Varyani, K. S., Pham, X. P. & Olsen, O. E., 2005. Application of double skin breakwater with holes for reducing green water loading on high speed container vessels. *International Shipbuilding Progress*, vol. 52, n. 3, pp. 273-292.