

MÉTODOS DE ESTUDOS DE POSSÍVEIS EFEITOS DA DETONAÇÃO DE MINAS NAVAIS SOBRE ALVOS

RODRIGO JEREMIAS DOS SANTOS*
Capitão-Tenente (EN)

SUMÁRIO

Introdução
A explosão na água
Gráficos dos métodos de estudo
Conclusão

INTRODUÇÃO

As minas navais, apesar de terem sido concebidas no século XVIII, mantêm suas qualidades fundamentais: são baratas, causam danos muito maiores que seu custo, são fáceis de lançar e difíceis de varrer (SENNA, 2011). Uma mina naval é um dispositivo explosivo colocado na água para danificar ou destruir navios de

superfície ou submarinos. Diferentemente das cargas de profundidade, as minas são depositadas e aguardam até serem acionadas pela aproximação ou contato com qualquer embarcação.

Atualmente, existem esforços no País no sentido de obter meios para a Guerra Antissubmarino (ASW – *Anti Submarine Warfare*), destacando-se entre eles o projeto dos submarinos da

* Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Eletrônicos pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Especialista em Engenharia de Armamento Aéreo pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Atualmente, serve na Seção de Bombas de Profundidade e Minas da Diretoria de Sistemas de Armas da Marinha (DSAM).

classe *Riachuelo*, em curso e baseado no de origem francesa da classe *Scorpène*, e o desenvolvimento de minas e sistemas de detecção de submarinos. Destacam-se, neste sentido, os projetos do Sensor Magnético Triaxial, Sistema de Aquisição de Dados Acústicos, Magnéticos e de Pressão (SAAMP) e Mina de Fundo (MF) do Instituto de Pesquisa da Marinha (IPqM).

Entretanto, além da óbvia disponibilidade do artefato bélico, são necessárias formas de se obter, mesmo que aproximadamente, noções dos resultados da utilização do mesmo.

Visando contribuir com os projetos citados, este artigo pretende apresentar alguns métodos de estudo de possíveis efeitos esperados sobre alvos navais causados por detonações de minas, sendo elaborados gráficos comparativos entre diferentes cargas, gerando a possibilidade de auxílio para determinação do emprego mais adequado.

A EXPLOSÃO NA ÁGUA

O efeito de sopro

Quando um artefato detona, sua carga explosiva é convertida quase que instantaneamente em gases a alta temperatura e altíssimas pressões. Sob a pressão dos gases em expansão, o invólucro da carga também se expande até que o limite de ruptura do material é atingido, ocorrendo então a fragmentação. Aproximadamente metade da energia dos gases produtos da detonação é utilizada para expandir o invólucro, que contém o explosivo em cerca de uma vez e meia o seu

diâmetro, imediatamente antes da ruptura do corpo e ejeção dos fragmentos (FERREIRA, 2016). A energia restante é gasta para comprimir o meio circundante e é a responsável pelo efeito de sopro (*blast*). A destruição é causada pela criação de uma sobrepressão que resulta no colapso estrutural do alvo.

O efeito de sopro é o efeito de sobrepressão em um meio, como o ar ou a água, devido à detonação de um explosivo. Durante uma detonação, há a geração de um grande volume de gases em alta temperatura e pressão em um período extremamente curto. A sobrepressão gerada provoca uma onda de sopro que se propaga em todas as direções. Essa onda tem como ponto de origem o centro da detonação e forma várias frentes de choque, conforme a Figura 1. Ela é caracterizada por um aumento instantâneo da pressão no meio, e sua intensidade é inversamente proporcional ao cubo do deslocamento da frente de choque a partir da origem (KINGERY *et al.*, 1984).

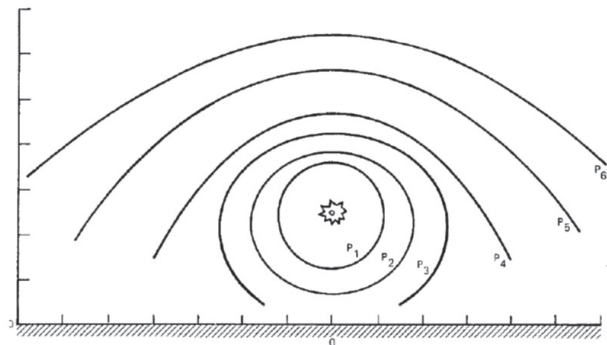


Figura 1 – Frentes de choque de uma onda de sopro (KINGERY *et al.*, 1984)

Para uma detonação do explosivo debaixo d'água, são apresentadas, na Figura 2, as principais ondas de choque geradas pelo efeito de sopro.

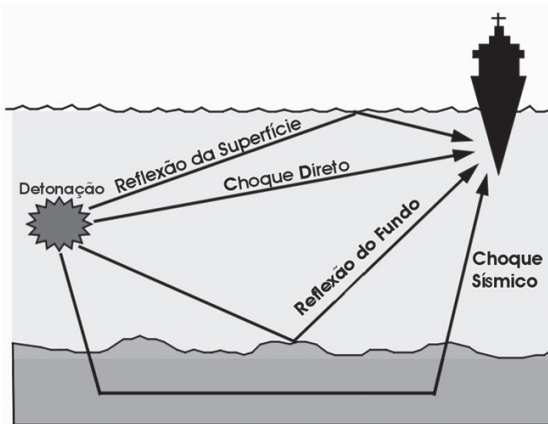


Figura 2 – Principais ondas de pressão geradas por uma explosão subaquática (FERREIRA, 2016)

A onda de choque direto é a que segue o caminho mais curto até o ponto de observação, com apenas o decaimento natural atenuando a amplitude da onda. É a onda considerada para análise dos estudos deste trabalho.

A onda de reflexão de fundo reflete o limite inferior da água. A onda refletida é atenuada parcialmente, dependendo da densidade do material.

A onda de choque sísmico é a transmitida por uma onda refletida no fundo, que viaja através do substrato antes de retornar à água. Sua intensidade depende de qual material é constituído o fundo, podendo este ser, por exemplo, arenoso ou rochoso.

A onda de reflexão de superfície ocorre devido à impedância acústica introduzida pelo ar, que é muito mais compressível e faz com que, essencialmente, toda a energia propagada retorne para a água. A onda de reflexão de superfície é uma onda de rarefação, ou onda de tensão, que efetivamente elimina o componente de compressão da onda direta ou da onda refletida no fundo quando eles se cruzam, sendo também conhecida como corte de superfície (*surface cutoff*) (SMITH, 2016).

Efeitos da Detonação na Água

Há diferenças significativas entre o comportamento de uma carga explosiva detonada no ar e na água. A densidade do ar, ao nível do mar e a 15°C e de acordo com a International Standard Atmosphere (ISA), é de 1,225 kg/m³, ao passo que a da água é de aproximadamente 997 kg/m³. Em uma detonação na água, a água ao redor da explosão constitui um ambiente mais denso que limita mais severamente a expansão dos gases e por um tempo mais longo do que a mesma explosão no ar.

Esses produtos gasosos com altíssima pressão, não dissipados tão facilmente, formam então uma bolha de gás, conforme ilustrado nas figuras 3 e 4.



Figura 3 – Ilustração da bolha de gás (FERREIRA, 2016)

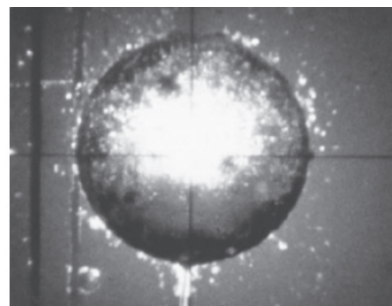


Figura 4 – Fotografia de bolha de gás real (FERREIRA, 2016)

O choque produzido pela detonação de um armamento na água é mais violento que a detonação do mesmo armamento no ar. Além disso, a pressão máxima decresce mais vigorosamente que no ar à medida que a distância ao ponto de detonação aumenta. Entretanto a duração é menor que no ar.

O ambiente mais denso da água confina os produtos gasosos da detonação em uma “bolha” de gás com altíssima pressão. Inicialmente, a bolha de gás tem uma pressão muito maior do que a do ambiente circundante, no caso, a pressão hidrostática (COLE, 1948). Após a formação da onda de pressão, as altas pressões dentro da bolha de gás fazem com que a bolha se expanda, forçando a água circundante “para fora”. O efeito inercial do movimento da água faz a bolha expandir até que a pressão interna do gás seja menor que a hidrostática (SULFREDGE; MORRIS; SANDERS, 2005). Como resultado, a água entra em colapso na bolha, recomprimindo o gás a uma pressão maior que a do ambiente, embora menor que a pressão inicial do gás. Isso inicia uma sequência de oscilações decrescentes da bolha, nas quais a expansão e a contração continuam, diminuindo de intensidade a cada oscilação, até que a bolha atinja a superfície da água ou seja amortecida pelo atrito do fluido viscoso (SULFREDGE; MORRIS; SANDERS, 2005). A duração entre a expansão e a contração é longa o suficiente para que a gravidade se torne eficaz. Essa bolha tem grande fluvariabilidade e, portanto, migra para cima. No entanto, ela não flutua como um balão, mas “dispara” em saltos (COPPENS; REINHARDT, 1993).

A Figura 5 demonstra o fenômeno relacionado ao pico de pressão e oscilações de bolha (ou pulsos).

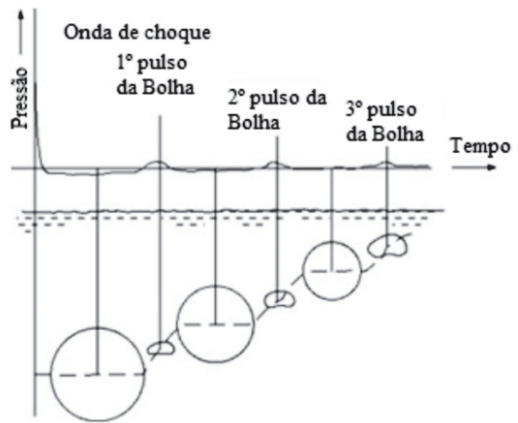


Figura 5 – Ondas de pressão e fenômeno de bolha (SNAY, 1956)

Outro parâmetro de importância relacionado com a oscilação da bolha é o raio máximo atingido na primeira oscilação, expresso por (SZTUROMSKI, 2015):

$$r_{max} = 1,53 \sqrt[3]{\frac{C}{1+0,1H}}$$

(1)

onde H é profundidade em metros e C é quantidade de carga explosiva em kg.

O conhecimento do raio da bolha é de grande utilidade quando o alvo atacado é uma estrutura sob a superfície da água, como no caso de navios. Ao término da oscilação, a bolha estoura e um jato d’água será formado com alta velocidade, que incidirá sobre a estrutura. Se a distância de detonação for próxima do raio da bolha, o efeito destrutivo sobre a estrutura será maximizado. Desta forma, além da onda de choque inicial, a estrutura será submetida à ação do jato. A Figura 6 exibe como a oscilação e o jato d’água podem atuar em um alvo na superfície.

Para um alvo submerso, a maior pressão ambiente e a fluvariabilidade da

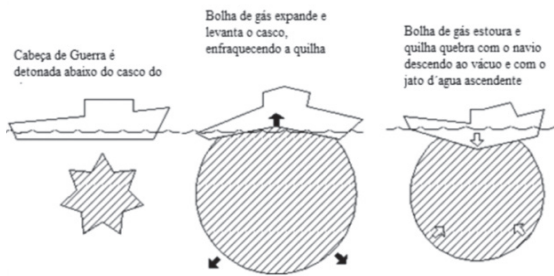


Figura 6 – Efeito da oscilação da bolha de gás próxima a um alvo na superfície d'água (WPNS, 2019)

água circundante impedem o que ocorre com o alvo na superfície. No entanto, a interação do vapor d'água da bolha e o casco submerso pode ser explorada para danificar gravemente ou potencialmente romper o casco do submarino. Com a detonação próxima ao alvo submerso, ocorre a oscilação deste vapor, causando um estresse cíclico no casco submerso, levando ao seu enfraquecimento ou à sua ruptura. Se o casco de um submarino for comprometido, é improvável que ele sobreviva. A Figura 7 exhibe o comportamento explicado.

Nem sempre há um modelo teórico para descrever alguns processos físicos.

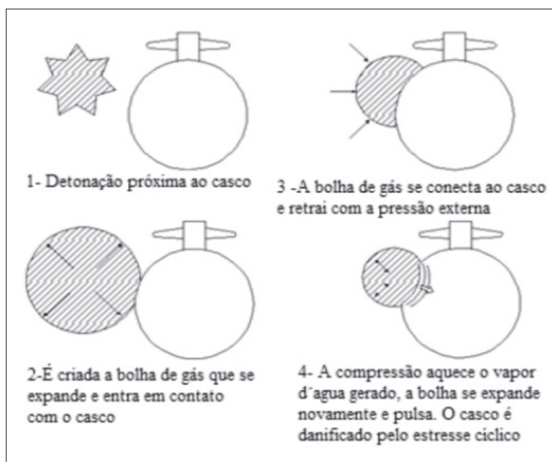


Figura 7 – Efeito da oscilação da bolha de gás próxima a um submerso (WPNS, 2019)

As equações necessárias não estão disponíveis ou são realmente muito complicadas para tornar as soluções factíveis. Para estudos de explosões, devido à dificuldade de modelagem matemática, alguns parâmetros físicos são obtidos diretamente por experimentos (COLE, 1948). A ideia com a utilização das Leis de Escalonamento é se aproximar do entendimento do comportamento de uma determi-

nada explosão por meio de técnicas de análise dimensional, para algum intervalo, sabendo-se certas características geradoras do fenômeno.

As leis de escalonamento para a propagação da onda de sopro na água dependem do explosivo em particular. A literatura (COPPENS; REINHARDT, 1993) apresenta quatro leis de escalonamento, uma para cada um dos seguintes parâmetros da onda de sopro:

- Pico de sobrepressão (P_{so});
- Tempo de duração escalonado ($\theta_{td} / C^{1/3}$);
- Impulso por unidade de área escalonado ($(I/A) / C^{1/3}$); e
- Densidade de energia de fluxo da onda de sopro escalonada por unidade de área ($(E/A) / C^{1/3}$).

Essas leis são expressas de uma forma genérica pela seguinte equação:

$$X = K_x \cdot \left[\frac{C^{1/3}}{r} \right]^{\alpha_x} \quad (2)$$

onde K_x e α_x assumem diferentes valores para cada um dos parâmetros da onda de sopro e para cada explosivo. O quadro 1

Parâmetro	P _{so} (Sobreprensão)		$\theta_{td}/C^{1/3}$ (θ_{td} : tempo de duração)		(I/A) / C ^{1/3} (I/A: Impulso/Área)		(E/A) / C ^{1/3} (E/A: Energia/Área)	
	MPa		$\mu\text{s} / \text{kg}^{1/3}$		$\text{kPa} \cdot \text{s}/\text{kg}^{1/3}$		$\text{kPa} \cdot \text{m}/\text{kg}^{1/3}$	
Explosivo	K _p	a _p	K _t	a _t	K _i	a _i	K _e	a _e
TNT	52,1	1,18	90	-0,19	5,88	0,98	91,7	2,14
COMP B	57	1,21	82	-0,27	5,87	0,93	101	2,13
Octol	54,5	1,2	90	-0,29	5,84	0,9	99,7	2,11
Destex	46,5	1,16	96	-0,26	6,03	0,89	83,4	2,05
Minol II	46,5	1,23	104	-0,37	7,05	0,87	107	2,09
HBX-3	50,4	1,15	104	-0,23	6,85	0,91	99,8	2,07
HBX-1	48,9	1,14	92	-0,25	6,49	0,87	104	2,04
H-6	53,5	1,21	94	-0,27	7,05	0,91	116	2,1
Comp C-4	56,3	1,35	107	-0,34	6,37	0,89	93,4	2,26

Quadro 1 – Parâmetros da Lei de Escalonamento para detonações subaquáticas (COPPENS; REINHARDT, 1993)

(COPPENS; REINHARDT, 1993) apresenta os valores onde K_x e α_x para uma série de explosivos, sendo válidos para $0,55 \leq r/C^{1/3} \leq 5,5 \text{ m}/\text{kg}^{1/3}$.

O valor de C deverá ser considerado descontando-se o fator de casco, que é o decréscimo equivalente da carga explosiva considerando a energia consumida para o rompimento do invólucro da carga durante a detonação.

Para tanto, utiliza-se a Fórmula de Fano modificada:

$$C_{EB} = C \cdot \left[0,6 + 0,4 \times \left(1 + \frac{2}{C/M} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

Neste caso, o valor de C é a própria massa de explosivo do armamento, M é valor da massa do invólucro metálico e CEB significa a massa de explosivo equivalente sem o invólucro metálico.

Efeitos da explosão subaquática sobre embarcações

O quadro 2 relaciona os efeitos sobre a embarcação com a intensidade de pressão de incidente gerada pelas chamadas explosões de influência (*underwater influence explosion*), ou seja, as explosões que têm seus efeitos baseados nos valores de pressão gerados. Os efeitos listados do estudo

Pressão (MPa)	Efeitos da ação da onda de choque sobre o navio
0,0 - 0,40	Seguro para todos os navios
0,0 - 2,0	Seguro para navios de guerra
2,0 - 4,0	Quebra de lâmpadas de iluminação, danos a equipamentos eletrônicos sensíveis, ruptura de elementos feitos de materiais frágeis
4,0 - 6,0	Danos a equipamentos eletrônicos, centrais de comunicação, equipamentos elétricos. Ferimentos leves experimentados pela tripulação, possibilidade de perder parcialmente capacidades de manobrar e combater
6,0 - 8,0	Danos severos a equipamentos eletrônicos, centrais de comunicação, equipamentos elétricos, falha de geradores, quebras de proteções de máquinas. Numerosos feridos entre a tripulação, diminuição considerável das capacidades de manobrar e combater
8,0 - 12,0	Deformação e ruptura do casco. Danos severos em máquinas e equipamentos elétricos, quebra de parafusos de fixação. Numerosos feridos entre a tripulação, alguns casos de morte. Perdas das capacidades de manobrar e combater. Necessidade de reparos em docas e estaleiros.
12,0 - 16,0	Deformação considerável e ruptura do casco e divisórias, alagamento de compartimentos. Destruição de máquinas e equipamentos elétricos. Numerosos casos de morte entre a tripulação. Perda total das capacidades de manobrar e combater. Necessidade de muitos meses para reparos em docas e estaleiros.
16,0 - 27,0	Possibilidade de o navio afundar. Ruptura de divisórias e ampla destruição de máquinas e equipamentos elétricos. Grande número de mortes entre os tripulantes. Se o navio não afundar poderá ser reparado.

Quadro 2 – Efeitos da ação da onda de choque sobre o navio (SZTUROMSKI, 2015)

foram realizados com detonações de cargas explosivas de 300 a 1.000 kg de TNT.

Um outro método muito utilizado de mensurar os danos em embarcações é fazer uso do chamado fator de choque, em inglês *Shock Factor* (SF). O SF é uma estimativa do grau de dano resultante do carregamento de choque causado por uma explosão subaquática. Geralmente relacionado a navios, é uma medida da energia aplicada sobre uma estrutura pela onda de choque, sendo uma função da massa de explosivo e da distância de separação entre a carga e o alvo (DA, 1987).

Comumente, são utilizadas duas medidas do fator de choque para alvos navais: fator de choque para o casco HSF (*Hull Shock Factor*) e fator de choque para a quilha KSF (*Keel Shock Factor*). O HSF é uma medida da energia da onda de choque que pode contribuir para danificar o revestimento do casco de um navio, sendo aplicado geralmente como um método de predição de dano para submarinos (DA, 1987). É uma função da massa equivalente em TNT da carga de explosivo, W , e da menor distância entre o ponto de detonação e o casco do

navio, R, como mostrado na Figura 8, sendo dada pela equação 4:

$$HSF = \frac{\sqrt{W_{TNT}}}{R} \quad (4)$$

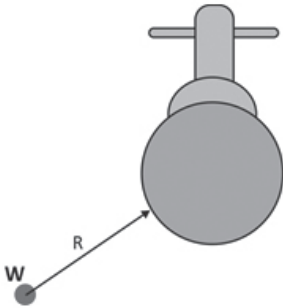


Figura 8 – Posicionamento da carga com relação ao casco de um submarino

Para navios de superfície, a posição da carga é geralmente medida em relação à quilha, como mostra a Figura 9, e o fator de choque KSF é dado pela equação 5.

$$KSF = \frac{\sqrt{W_{TNT}}}{R} \left(\frac{1 + \cos \theta_{KSF}}{2} \right) \quad (5)$$

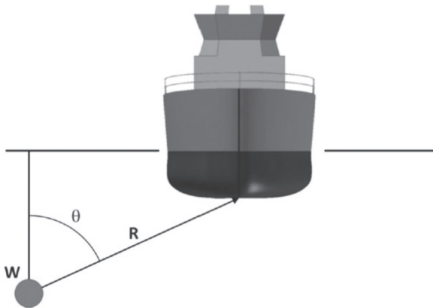


Figura 9 – Esquema para o cálculo do KSF

A reação do navio ocorre principalmente na vertical, sendo necessário corrigir o ângulo em que a onda de choque impacta o alvo quando a carga não é detonada diretamente sob a quilha. Esta correção é computada pelo ângulo θ_{KSF} , que é o ângulo de incidência formado pela vertical abaixo da linha d'água e a distância radial da carga à quilha do navio, como mostrado na Figura 9.

O quadro 3 mostra os níveis de fatores de choque e o dano associado esperado sobre as embarcações.

SF (lb, ft)	SF (kg, m)	Dano Associado
< 0,10	< 0,22	Muito limitado. Geralmente considerado insignificante
0,10 – 0,15	0,22 – 0,33	Falhas elétricas e na iluminação, possível ruptura de tubulações
0,15 - 0,20	0,33 – 0,44	Danos aumentados, provável ruptura de tubulações, falhas no maquinário
0,20 – 0,50	0,44 – 1,11	Falha geral no maquinário
$\geq 0,50$	$\geq 1,11$	Geralmente considerado letal para o navio

Quadro 3 – Dano estimado baseado na magnitude do KSF (DA, 1987)

GRÁFICOS DOS MÉTODOS DE ESTUDO

Sobrepessão

Para realização das análises dos efeitos da detonação na água, o valor de C_{EB} de todas as minas será aproximado à metade dos seus valores de carga de explosivo, pois, para utilizar a equação 3, seria necessário o conhecimento do peso de seus invólucros. Assim é possível traçar um gráfico, por meio do programa

Matlab, de diversas minas com a relação de sobrepressão com a distância do centro da detonação.

Para critérios de comparação, será traçado um gráfico até o limite de 60 m de distância, minas com valores de 50, 100, 300, 500, 750 e 1000 kg e todas com carga de TNT. Será utilizada a relação de sobrepressão e distância com a equação 2 e os parâmetros de lei de escalonamento para TNT do quadro 1.

Raio Máximo da Bolha de Gás

A próxima abordagem a ser realizada consiste no gráfico do Raio Máximo da bolha de gás formada pela detonação na água com relação da profundidade em que ocorre a detonação. É utilizado, então, a equação 1, para até 60 metros de profundidade com as mesmas minas hipotéticas. O estudo destes gráficos está intimamente ligado ao que é detalhado

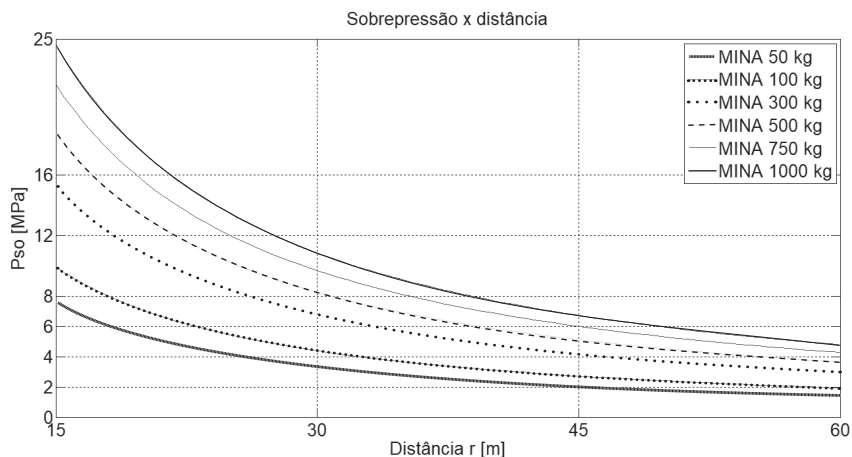


Figura 10 – Gráfico entre sobrepressão e distância para as minas pressupostas

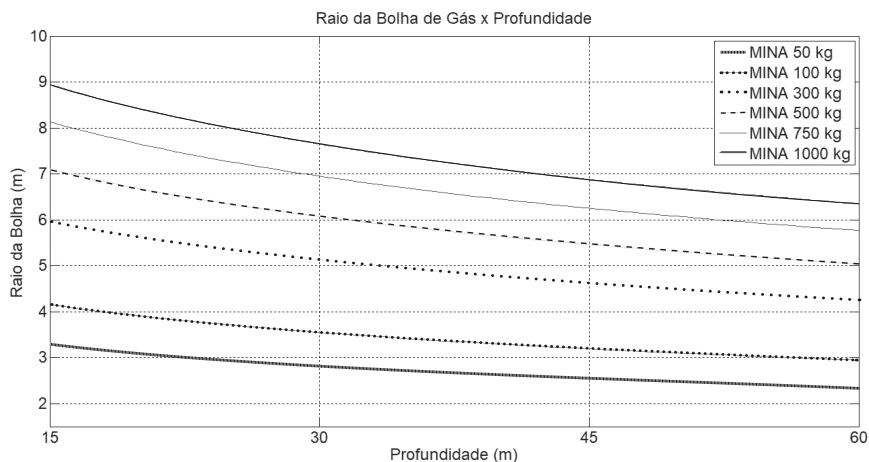


Figura 11 – Gráfico Raio Máximo da Bolha e Profundidade para Minas hipotéticas

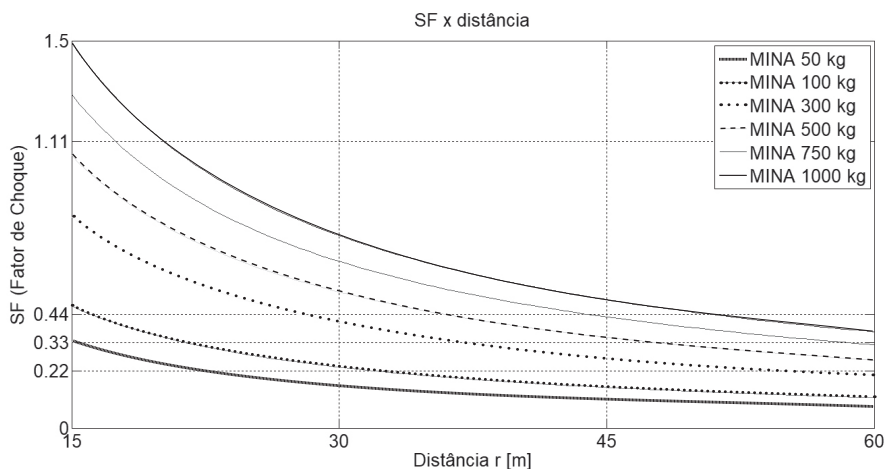


Figura 12 – Gráfico entre Fator de Choque e distâncias para as minas hipotéticas

para os efeitos da bolha de gás, conforme descrito anteriormente.

Fator de Choque

Uma última análise é feita utilizando o fator de choque. Será considerado o efeito para alvos submersos ou os navios de superfície perpendiculares à detonação.

A equação 4 é a utilizada para as mesmas minas hipotéticas.

Comparação entre os métodos de Sobrepressão e Fator de Choque

De posse dos gráficos, é possível montar um quadro comparativo entre análise de possíveis efeitos esperados das detona-

Mina	SP	SF	SP	SF	SP	SF	SP	SF
	15 m de distância da detonação		30 m de distância da detonação		45 m de distância da detonação		60 m de distância da detonação	
50 kg (TNT)	Danos graves	Danos médios	Danos leves	Danos desprezíveis	Danos leves	Danos desprezíveis	Danos desprezíveis	Danos desprezíveis
100 kg (TNT)	Danos graves	Danos graves	Danos médios	Danos leves	Danos leves	Danos desprezíveis	Danos desprezíveis	Danos desprezíveis
300 kg (TNT)	Danos graves	Danos graves	Danos graves	Danos médios	Danos médios	Danos leves	Danos leves	Danos leves
500 kg (TNT)	Possível afundamento	Danos graves	Danos graves	Danos graves	Danos médios	Danos médios	Danos leves	Danos leves
750 kg (TNT)	Possível afundamento	Possível afundamento	Danos graves	Danos graves	Danos médios	Danos médios	Danos médios	Danos médios
1000 kg (TNT)	Possível afundamento	Possível afundamento	Danos graves	Danos graves	Danos graves	Danos graves	Danos médios	Danos médios

Sobrepressão (SP) e Fator de Choque (SF)

Quadro 4 – Danos prováveis relacionados aos métodos e distâncias para as minas pressupostas

ções das minas hipotéticas com relação à sobrepressão e ao fator de choque.

O quadro 4 demonstra que, para as cargas com valores menores que 300 kg de TNT, fica a cargo do decisor optar por uma estimativa mais conservadora com o fator de choque ou otimista com o método de sobrepressão. Os estudos apresentam resultados praticamente idênticos para minas com cargas entre 300 kg e 1.000 kg de TNT.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a importância das minas navais, tendo como destaque

os possíveis efeitos de detonação na água com os estudos disponíveis atualmente que, mesmo que extraídos de relações diversas empíricas, são extremamente necessários para o entendimento destes fenômenos para direcioná-los em uma atuação bélica. Desta forma, são analisados os resultados prováveis causados em alvos por minas com diferentes valores de cargas. Este estudo possibilita, com os dados apresentados, elaborar gráficos comparativos hipotéticos e ter um melhor entendimento da aplicação mais adequada para determinadas minas navais.

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:
<ARTES MILITARES>; Defesa; Guerra de minas;

REFERÊNCIAS

- COLE, R. H. *Underwater Explosions*, New Jersey: Princeton University Press, Princeton, 1948. 437 p.
- COPPENS, Alan B.; REINHARDT, Richard A. *Explosives and Explosions*. Monterey, California: Naval Post Graduate School, 1993.
- FERREIRA, Paulo Cesar Miscow. *Curso AA-810 – Letalidade*. Notas de aula em apresentação digital. São José dos Campos. ASD, 2016. Curso de Especialização em Engenharia de Armamento Aéreo.
- KINGERY, Charles N. *et al. Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst*. Maryland, US : Aberdeen Proving Ground, Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory, 1984. 124 p.
- SENNA. Cláudio José d'Alberto. “O Poder das Minas: Seu Emprego na Estratégia Naval Contemporânea”. *Revista da Escola de Guerra Naval*, Rio de Janeiro, v. 17 n. 2 p. 199-211, jul-dez-2011.
- SMITH, Paul R. *Underwater Explosion Energy Dissipation Near Waterborne Infrastructure*. 2016. Disponível em: https://uknowledge.uky.edu/ce_etds/35. Acesso em: 18 set. 2019.
- SNAY, H.G. “Hydrodynamics of underwater explosions”. In: Symposium on Naval Hydrodynamics. 1956. Washington, D.C.: National Academy of Sciences. *Proceedings* [...]. SNHH, 1956.

- SULFREDGE, D. C.; MORRIS, R. H.; SANDERS, R. L. *Calculating the Effect of Surface or Underwater Explosions on Submerged Equipment and Structures*. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2005. 14 p.
- SZTUROMSKI, Bogdan. “The Effect of an Underwater Explosion on a Ship”. *Scientific Journal of Polish Naval Academy*, n. 201, p. 57-73, 2015.
- UNITED STATES. Department of the Army. TM5-855-1: fundamentals of protective design for conventional weapons, Washington DC: DA, 1987.
- WESTERN PACIFIC NAVAL SYMPOSIUM. *Introduction to Naval Weapons Engineering*. Disponível em: https://fas.org/man/dod101/navy/docs/es310/uw_wpns/uw_wpns.htm. Acesso em: 15 set. 2019.