

ESTUDO NUMÉRICO DAS PRESSÕES DE ONDA DE CHOQUE EM DIFERENTES MEIOS E SUA TRANSMISSÃO

Murilo Limeira da Costa Neto (1); Graciela Doz (2)

Resumo

Pesquisas relacionadas às explosões e à propagação das ondas de choque são de grande importância dada sua grande aplicabilidade em diversos setores produtivos, como, por exemplo, na indústria, na mineração e na engenharia. Quando não planejadas, a detonação de explosivos químicos, como o TNT, pode representar um risco severo às instalações e seus usuários. As pressões produzidas e a propagação da onda de choque são influenciadas pelo meio em que aconteceu a explosão, seja pela presença de obstáculos ou mesmo pelo ambiente, como o ar ou a água. Nesse contexto, este artigo traz uma visão geral das características de explosões em diferentes meios, avaliando também o efeito de transmissão de energia da onda através de diferentes materiais. Para estes estudos foram desenvolvidas simulações utilizando o software de fluidodinâmica computacional *Autodyn Ansys*®. Os modelos desenvolvidos foram separados em dois grupos, o primeiro para o estudo da explosão em diferentes meios e o segundo para a avaliação da transmissão da energia da onda. Os resultados obtidos com as simulações, foram comparados com propostas de outros autores e avaliados criticamente. Estes fundamentaram uma base importante para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

Palavras-chave: *Explosões, Ondas de choque, Fluidodinâmica Computacional*

(1) MEng, Universidade de Brasília – eng_murilolimeira@hotmail.com

(2) Professor, Doutor, Universidade de Brasília - graciela@unb.br

Campus Darcy Ribeiro, primeiro andar, 70910-900, Brasília, Brasil

<http://dx.doi.org/10535/rsaae.v14i2.7219>

Introdução

A predição do dano devido a um evento envolvendo explosões, muitas vezes, é complexa de ser realizada visto as muitas não-linearidades envolvidas. Além disso, experimentos nesta área costumam ser caros e perigosos. Neste âmbito, as ferramentas computacionais podem ser úteis para simulação e análise deste tipo de evento.

Enquanto se propaga, a onda de choque produzida por uma explosão vai perdendo energia, isto pode ser observado pelos decréscimos na pressão de onda a partir do primeiro pico de sobrepressão, Vijayraghavan et al. (2012). As ondas de choque são o mecanismo primário de dano de uma explosão Applied Technology Council e Hinman (2003), por isso sua predição adequada tanto ao ar livre como sob a água são importantes.

A interação da onda de choque com elementos rígidos resulta na reflexão dessa, assim como a transmissão de parte dela pelo novo meio. A importância do estudo desta interação e do fenômeno de transmissão da energia da onda se dá pela necessidade de se projetar proteções eficientes para as estruturas.

Este trabalho apresenta um estudo desenvolvido sobre explosões em diferentes meios e uma avaliação inicial da transmissão da energia da onda de choque. Para isto, foram desenvolvidas simulações utilizando o software de fluidodinâmica computacional *Autodyn* do pacote *Ansys*® *Workbench* 15 de 2014.

As simulações desenvolvidas foram divididas em dois grupos, no primeiro grupo, em que se optou por uma modelagem em elemento unidimensional (1D), foram modeladas explosões no ar e sob a água. Os resultados quanto às pressões de onda de choque deste primeiro grupo foram comparados com predições empíricas de diferentes autores, sendo discutidos os aspectos mais importantes envolvidos.

No segundo grupo de simulações foram utilizados elementos planos (2D) e avaliou-se a influência da posição e do tipo de obstáculo no dano causado a um elemento de concreto posicionado a 0,2 m da explosão. Os resultados foram avaliados criticamente e serão base para trabalhos futuros relacionados à proteção de estruturas submetidas a explosões próximas.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Parâmetros básicos das explosões ao ar livre

Em uma explosão ao ar livre, ocorre a liberação de um grande volume de gases aquecidos que se expandem rapidamente, Showichen (2008). A propagação destes gases em elevadas velocidades e a diferença de pressão, produz uma camada de ar comprimido chamada de onda de choque. Maiores detalhes relacionados ao processo de detonação de explosivos químicos e sobre a física da explosão podem ser facilmente encontrados em literaturas especializadas, como os trabalhos de Siba (2014) e Usmani (2012).

Parâmetros importantes para o estudo das explosões podem ser mensurados primariamente conhecendo a quantidade de energia liberada na detonação do explosivo e sua distância até o ponto de análise, por isso é comum a utilização de leis de escala. A lei de escala mais utilizada foi desenvolvida por Hopkinson apud Chock (1999), ela estabelece que dispositivos explosivos de composição diferente, de mesma geometria e detonados sob as mesmas condições apresentarão as mesmas características de onda de choque desde que preservada a distância em escala (Z), Equação 1.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

Em que Z é a distância em escala em $\text{m/kg}^{1/3}$, R é a distância da explosão ao ponto de análise em metros e W é a massa do explosivo em kg de TNT.

2.1.1 Proposições para predição das sobrepressões de uma onda de choque ao ar livre

Considerando que as ondas de choque são o mecanismo primário de dano de uma explosão, a previsão adequada das sobrepressões (ΔP) é necessária para o desenvolvimento de estudos relacionados à segurança de edificações. A Tabela 1 apresenta uma série de formulações definidas pelas Eq. (2), Eq. (3), Eq. (4), Eq. (5), Eq. (6), Eq. (7), Eq. (8) e Eq. (9), para predição das sobrepressões de onda de choque. Estas fórmulas estão em função da distância em escala (Z), da massa do explosivo (W) e a distância até a explosão (R), elas podem ser encontradas nas bibliografias especializadas como Smith e Hetherington (1994), Moon (2009), Ngo et al. (2007) e Kinney e Graham (1985).

Tabela 1. Formulações para predição das sobrepressões de onda de choque ao ar livre

Autor	Fórmulas de predição	Requisito	Unidade
Brode	$\Delta P = \frac{6,7}{Z^3} + 1$ (2)	$\Delta P > 10$	Bar
	$\Delta P = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019$ (3)	$0,1 < \Delta P < 10$	Bar
Henrych	$\Delta P = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,540}{Z^2} - \frac{0,357}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4}$ (4)	$0,05 \leq Z \leq 0,3$	Bar
	$\Delta P = \frac{6,194}{Z} - \frac{0,326}{Z^2} + \frac{2,132}{Z^3}$ (5)	$0,3 \leq Z \leq 1$	Bar
	$\Delta P = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3}$ (6)	$1 \leq Z \leq 10,$	Bar
Mill	$\Delta P = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z}$ (7)	-	kPa
Kinney	$\frac{\Delta P}{P_o} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt[2]{1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2} \sqrt[2]{1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2} \sqrt[2]{1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2}}$ (8)	-	-
Newmark	$\Delta P = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}}$ (9)	-	Bar

2.2 Parâmetros básicos das explosões sob a água

As explosões sob a água produzem dois tipos de pulsos, a onda de choque e o pulso bolha que são considerados os mecanismos de dano primários. Em condições atmosféricas padrão a densidade da água é cerca de 800 vezes maior que a do ar em (Ambrósio et al. 2013), a compressibilidade da água também é inferior fazendo com que a onda de choque atinja picos maiores de sobrepressão nesse meio. Entretanto, a duração da onda de choque sob a água é mais curta, Glasstone e Dolan (1997). Assim como ocorre nas explosões ao ar livre, em uma explosão sob a água, o valor máximo da pressão da onda de choque em um determinado ponto está relacionado à quantidade de explosivo envolvido assim como à distância até a explosão.

2.2.1 Fórmulas para predição das sobrepressões de uma onda de choque sob a água

Utilizando o conceito de distância em escala Z é possível definir a pressão máxima de uma onda de choque (P_m) sob a água segundo as Eq.10, Eq.11 e Eq. 12 mostradas na Tabela 2. Estas formulações podem ser encontradas em publicações especializadas como Smith e Hetherington (1994) e Jha e Kumar (2014).

Tabela 2. Formulações para predição de sobrepressão de onda de choque sob a água

Autor	Fórmulas de predição	Requisito	Unidade
Smith e Hetherington	$P_m = \frac{355}{Z} + \frac{115}{Z^2} - \frac{2,44}{Z^3}$ (10)	$0,05 \leq Z \leq 10$	Bar
	$P_m = \frac{294}{Z} + \frac{1387}{Z^2} - \frac{1783}{Z^3}$ (11)	$10 \leq Z \leq 50$	Bar
Cole	$P_m = 52,16 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13}$ (12)	-	MPa

2.3 Conceitos básicos sobre reflexão e transmissão de ondas

O trabalho apresentado por Monti (1970) foi um dos precursores da análise sobre a interação entre ondas de choque e materiais sólidos deformáveis. A aplicação deste tipo de conhecimento está relacionada a criação de dispositivos ou desenvolvimento de novos materiais que possam mitigar os danos de uma explosão.

Quando uma onda atinge uma região de fronteira entre dois materiais parte dela é refletida e a outra transmitida através da interface de contato, Krauthammer (2008). A impedância de choque, advinda do conceito de impedância acústica, é um parâmetro importante que permite uma avaliação inicial sobre a distribuição da energia da onda na região de interface entre os materiais. Considerando uma onda de choque de incidência normal, através da impedância de choque é possível relacionar as pressões incidente e transmitida. Nesse aspecto várias pesquisas já foram realizadas, por exemplo, Kazemi-Kamyab et al. (2011) que avaliaram a transmissão de tensão em materiais porosos. Shen e Ren (2013) abordaram sobre a transmissão de ondas de tensão em elementos tipo sanduíche preenchidos por concreto de baixa densidade e Codina et al. (2016) apresentaram um estudo sobre o efeito de explosões próximas em colunas de concreto.

3 Modelagem numérica

3.1 Ferramentas numéricas

As simulações numéricas desenvolvidas neste trabalho foram desenvolvidas no hidrocódigo Ansys Autodyn ® (2014). Este possibilita a modelagem de fenômenos dinâmicos não lineares como o de explosões e impactos, Robertson et al (1994). Durante o processamento de uma

Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 14, n. 2, p. 55-76, Mai./Ago. 2017

simulação as equações de conservação de movimento, massa e energia, acopladas com as descrições das propriedades dos materiais, são solucionadas de forma simultânea em cada intervalo de tempo (*timestep*), Gebbeken e Ruppert (1999).

3.2 Modelos simulados

As simulações neste trabalho foram divididas em dois grupos. No primeiro grupo foi executada uma análise das sobrepressões de uma explosão em diferentes meios, enquanto que no segundo grupo foram analisadas as características de transmissão da onda de choque.

3.2.1 Primeiro grupo de simulações

O primeiro grupo é composto por simulações que visam o registro das sobrepressões da onda de choque advinda da detonação de 10 kg de TNT no ar e sob a água. Para efetuar este registro foram posicionados sensores virtuais em todos os modelos. Ao todo foram utilizados cinco sensores que distam 1,2 m, 2,0 m, 3,0 m, 4,0 m e 5,0 m do ponto de detonação da carga de TNT.

Os modelos foram elaborados como unidimensionais, sendo desenvolvidos a partir de uma geometria de cunha associada a um solver 2D multi-material. A Figura 1 ilustra a geometria utilizada para análise e a posição dos sensores virtuais utilizados.

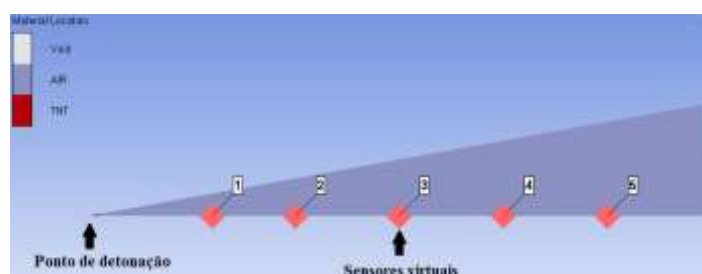


Figura 1. Geometria da cunha, posicionamento dos sensores e definição do ponto de detonação

O Autodyn gera automaticamente a geometria da cunha, sendo necessários, como dados de entrada, apenas os valores do raio interno e do raio externo para definir o comprimento do elemento. Os valores adotados foram de 6 m e 0,01 m para os raios externo e interno, respectivamente. Estas dimensões são suficientes para se inserir a massa de explosivo no modelo bem como todos os sensores virtuais.

Neste grupo de simulações, tanto para as explosões ao ar e sob a água, foram desenvolvidos cinco modelos em que se aumentou gradativamente o refinamento da malha. As malhas utilizadas foram de 4.10^{-3} m, 2.10^{-3} m, 1.10^{-3} m, $0,5.10^{-3}$, $0,1.10^{-3}$ e $0,06.10^{-3}$ m.

3.2.2 Segundo grupo de simulações

O segundo grupo de simulações foi desenvolvido para a análise da transmissão da energia da onda de choque. Neste caso, um elemento de concreto com 200 mm de espessura e 1500 mm de altura foi submetido a detonação de 8kg de TNT a uma distância de 200 mm. Entre o explosivo e o elemento de concreto foram posicionados obstáculos diversos compostos por elementos de aço e alumínio, sendo também aplicado preenchimento com areia. Por meio disso buscou-se avaliar a eficiência dos sistemas quanto à mitigação do dano. O caso simulado trata de uma explosão próxima e existem poucos dados de experimentais relacionados a este tipo de evento, Remennikov e Uy (2014).

Para o desenvolvimento dos modelos, utilizou-se uma abordagem bidimensional baseada na discretização em elementos planos. A malha utilizada foi de 1 mm. Foram adotadas condições de contorno de modo que não houvessem reflexões de onda na fronteira do elemento ar, enquanto que nos elementos metálicos e de concreto, as condições de contorno utilizadas na base e no topo dos modelos simulavam um engastamento. Como parâmetro de análise entre as simulações, verificou-se o nível de dano no elemento de concreto para as diferentes configurações de proteção.

3.3 Considerações de modelagem e propriedades dos materiais

Os softwares baseados em fluidodinâmica computacional requerem uma equação de estado para definição dos materiais utilizados nas simulações. O ar foi caracterizado segundo as propriedades atmosféricas padrão ao nível do mar, sendo adotada para ele a equação de estado de gás ideal.

Para a definição do material água foi utilizada a equação de estado de choque. As propriedades da água utilizada nas simulações foram encontradas na biblioteca do Autodyn e são similares as adotadas no trabalho de Jha e Kumar (2014).

A equação de estado JWL, desenvolvida por Jones-Wilkins-Lee, foi utilizada para descrever a expansão dos produtos de detonação do explosivo. O TNT foi modelado segundo as propriedades padrão definidas na biblioteca do Autodyn.

A equação de estado P-alpha, Herrmann (1969), em conjunto com o modelo RHT que define resistência e falha, foi utilizado para modelagem do concreto. Esta equação de estado fornece uma boa representação do comportamento de materiais porosos submetidos a grandes tensões. O concreto utilizado nas simulações possui resistência à compressão de 35 MPa e as demais propriedades (Tabela 3) são similares às encontradas no trabalho de Nystrom e Gylltoft (2009).

Tabela 3. Propriedades do concreto

Concreto	
Densidade de referência	2,50 g/cm ³
Resistência á compressão	35 MPa
Calor específico	654 J/kgK
Temperatura de referência	300 K

A equação de estado de compactação foi utilizada para caracterização da areia seca, esta e outras considerações empregadas para este material são similares às adotadas por Luccioni e Ambrosini (2008) que avaliaram os efeitos de explosões sob o solo.

Foi utilizado aço com especificação A36 para a geração dos modelos e optou-se por uma equação de estado linear para descrever o comportamento elástico do material. Estas características físicas do aço são similares às adotadas por Nystrom e Gylltoft (2009) e estão apresentadas na Tabela 4, porém, é importante salientar que estes autores empregaram um aço de maior resistência em suas simulações.

Tabela 4. Propriedades do aço

Aço	
Densidade de referência	7,85 g/cm ³
Módulo volumétrico	1,40.10 ⁵ MPa
Calor específico	477 J/kgK
Temperatura de referência	300 K

Os elementos em alumínio empregados possuem especificação 7075-T6, com tensão de escoamento de 420 MPa. A equação de estado de choque foi empregada na simulação deste material, conforme o modelo padrão apresentado pelo *Autodyn*.

3.4 Modelos de erosão e condições de contorno

A função erosão é um recurso numérico utilizado para remover células desnecessárias e altamente distorcidas que poderiam reduzir a velocidade de processamento, Abdelalim (2013). Para definição da erosão foi adotado o modelo de deformação geométrica instantânea efetiva que já foi estudado em alguns trabalhos como o de Esteban e Gebbeken (2016) e Luccioni et al. (2013), sendo adotados os limites de deformação de 0.5 para o concreto e de 2.0 para o aço, alumínio e areia. As condições de contorno adotadas nas fronteiras do modelo permitem a propagação da onda através desta sem que haja reflexão. O topo e a base dos elementos sólidos de aço, alumínio e concreto foram fixados de modo simular os apoios. Foi habilitada a interação Euler-Lagrange de modo a permitir uma análise da interação fluido-estrutura.

4 Resultados

4.1 Primeiro grupo de simulações

Os resultados obtidos para as sobrepressões da onda de choque da explosão ao ar livre e as respectivas soluções das predições analíticas são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados para sobrepressão de onda em MPa, explosão ao ar livre

Z (m/kg ^{1/3})	Análises numéricas						Henrych	Brode	Kinney
	Tamanho da Malha (mm)								
	0,06	0,1	0,5	1,0	2,0	4,0			
0,557	2,986	2,981	2,942	2,893	2,824	2,756	2,241	2,259	3,276
0,928	1,076	1,075	1,075	1,062	1,041	1,005	0,895	0,877	1,179
1,392	0,409	0,409	0,409	0,407	0,401	0,392	0,378	0,359	0,480
1,857	0,206	0,206	0,206	0,206	0,204	0,201	0,205	0,184	0,247
2,321	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,124	0,130	0,114	0,146

Observa-se a convergência dos resultados das pressões para os diferentes tamanhos de malha em pontos afastados do local da explosão. Em termos de pressão de onda, os resultados da malha com 2 mm tendem a ser mais precisos para distâncias superiores a 5 m da explosão (2,321

m/kg^{1/3}), já os da malha de 1 mm e de 0,5 mm apresentam convergência para distâncias da explosão superiores a 4 m (1,857 m/kg^{1/3}) e 2 m (0,928 m/kg^{1/3}), respectivamente. Não foi possível observar a convergência dos resultados quando analisadas regiões muito próximas do ponto de detonação. A Figura 2 apresenta os resultados mostrados na Tabela 5.

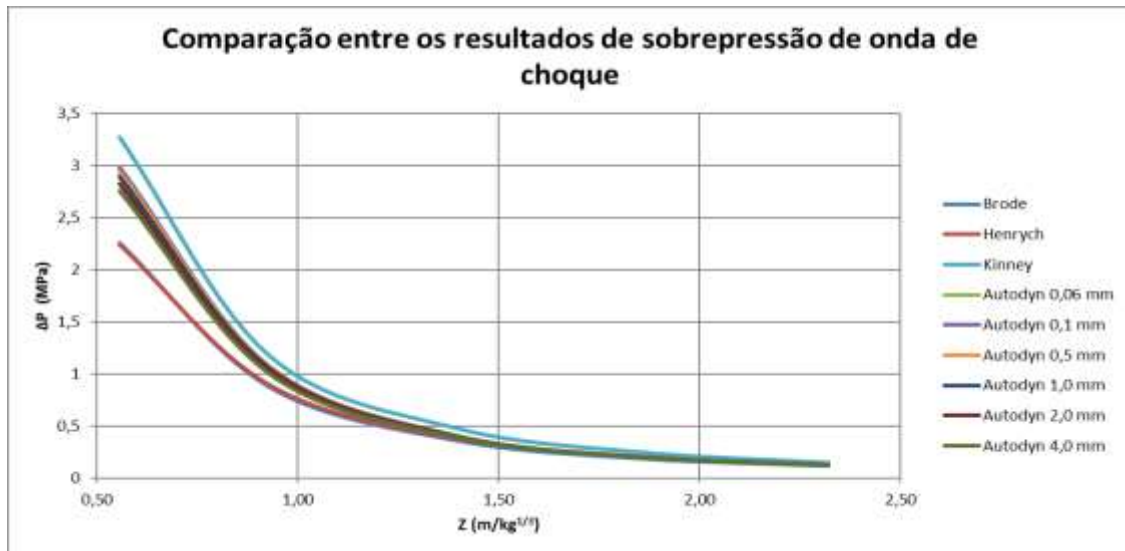


Figura 2. Sobrepressão em função da distância em escala, explosão ao ar livre.

A Tabela 6 apresenta os resultados para sobrepressão de onda de choque obtidos para a explosão na água, assim como os resultados das previsões analíticas relacionadas.

Tabela 6. Resultados para sobrepressão de onda em MPa – Explosão na água

Z (m/kg ^{1/3})	Análises numéricas Tamanho da Malha (mm)						Cole	Smith e Hetherington
	0,06	0,1	0,5	1,0	2,0	4,0		
0,557	117,89	117,80	117,50	116,80	115,70	114,40	101,05	99,39
0,928	60,28	60,20	59,79	59,23	58,23	57,30	56,73	51,28
1,392	36,56	36,48	35,97	35,44	34,57	33,80	35,88	31,33
1,857	25,88	25,81	25,31	24,83	24,07	23,49	25,92	22,41
2,321	19,86	19,81	19,33	18,90	18,21	17,73	20,15	17,41

Nos gráficos da Figura 3 estão os resultados de sobrepressão de onda choque obtidos para o caso da explosão na água. Apesar do grande refinamento utilizado não foi possível definir com precisão o ponto de convergência dos resultados de pressão para este caso, entretanto observa-

se uma maior estabilidade dos resultados a partir da malha de 0,1 mm. Com relação aos métodos de predição apresentados a proposta de Cole ficou mais próxima dos resultados obtidos numericamente.

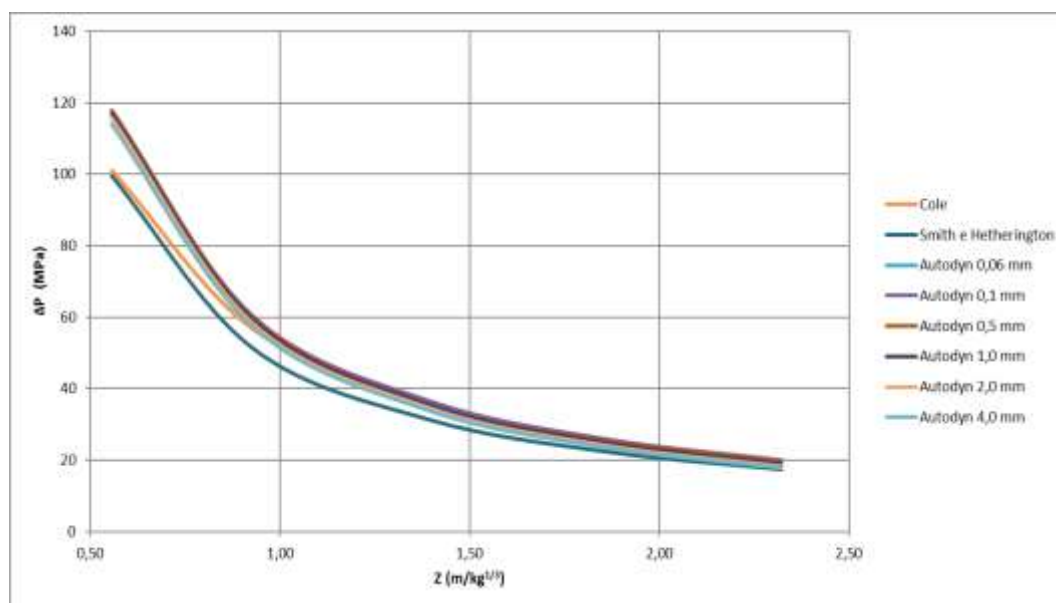


Figura 3. Resultados para sobrepressão da onda de choque na água.

Avaliando o desempenho das malhas utilizadas com relação ao custo computacional e a estabilidade dos resultados, pode-se recomendar a utilização de malhas de 0,5 mm para o estudo de explosões sob a água em modelos unidimensionais, visto que a variação dos resultados em termos percentuais com a malha de 0,1 mm é inferior a 5%. A viabilidade da utilização da malha de 0,5 mm para este tipo de análise também foi comprovada no trabalho desenvolvido por Jha e Kumar (2014). Comparando os resultados de sobrepressão das ondas de choque ao ar livre com as na água observa-se uma grande diferença entre os valores máximos. Isto se deve aos diferentes valores de densidade e compressibilidade desses meios, desse modo é esperado que no meio mais denso os resultados para as sobrepressões de onda de choque sejam maiores.

4.2 Segundo grupo de simulações

O segundo grupo de simulações avaliou o nível de dano causado a um elemento de concreto devido a uma explosão de 8 kg de TNT a uma distância de 200 mm, considerando obstáculos entre o explosivo e o alvo. Analisou-se a transmissão da energia entre os diferentes materiais, quais foram os principais mecanismos de dano e que configuração absorveu maior quantidade de energia da explosão.

A primeira simulação realizada neste grupo (S1) foi desenvolvida como parâmetro comparativo, não foram modeladas proteções neste caso. Baseando-se nos trabalhos de Remennikov et al. (2015) e Yue et al.(2017) é possível afirmar que a detonação de 8kg de explosivo dentro da distância considerada é mais que suficiente para perfurar um elemento de concreto convencional. A Figura 4 ilustra o esquema do modelo com as condições de contorno adotadas para restringir o movimento do sólido. Na mesma figura também é mostrado o padrão de dano no elemento em 2,5 ms do início da explosão. Na imagem é utilizada uma escala de dano (*damage*), em que 0 (cor azul) representa o material íntegro e 1 a falha completa (cor vermelha) . Como esperado, a explosão produzida é forte o suficiente para colapsar o elemento, na Figura 4 é possível constatar a linha de falha próxima dos apoios.

Nas próximas simulações deste grupo, serão posicionadas proteções entre o explosivo e o elemento de concreto, sendo avaliada a eficiência dessas na mitigação do dano.

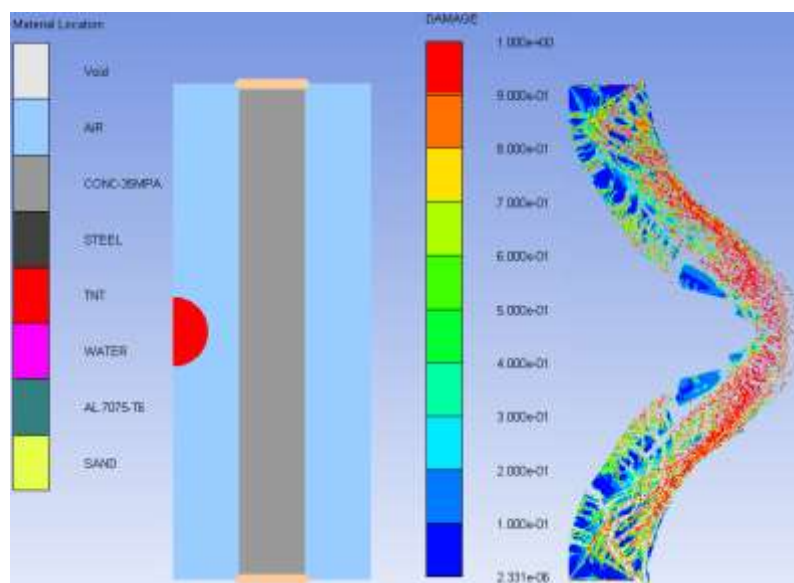


Figura 4. Modelo e seção danificada da parede de concreto após a explosão, S1.

No modelo S2 (Figura 5), foram posicionadas duas chapas de 5 mm de aço distantes 3 mm entre si e do elemento de concreto. Nessa simulação buscou-se avaliar se a interface de ar inserida entre os obstáculos e o elemento de concreto, promoveria alguma redução na magnitude da tensão, visto que haveria seguidas mudanças da impedância. Os resultados de S2 indicaram que a influência destas chapas na mitigação do dano foi mínima. Isto se deve ao fato de que as chapas de aço se deformaram rapidamente e transferiram mecanicamente esta energia até o

elemento de concreto que entrou em ruptura, não houve participação efetiva do processo físico da mudança de impedância na mitigação do dano.

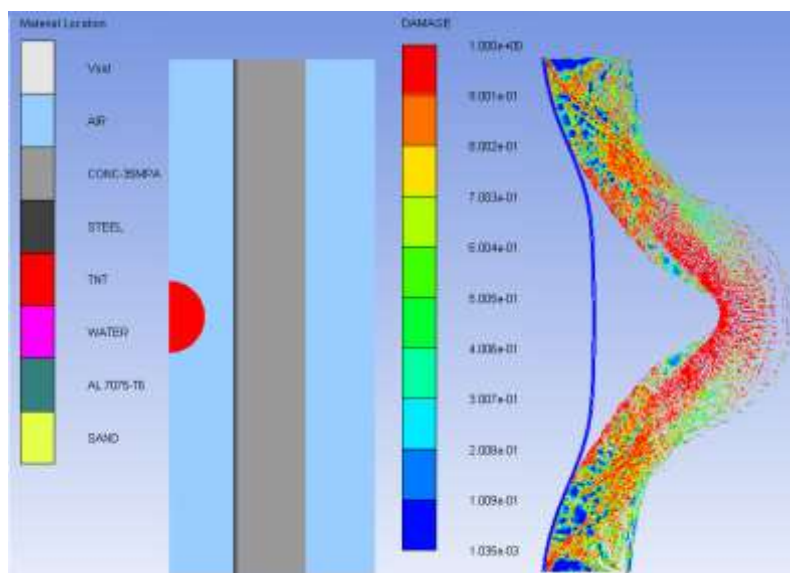


Figura 5. Modelo e seção danificada da parede de concreto após a explosão, S2.

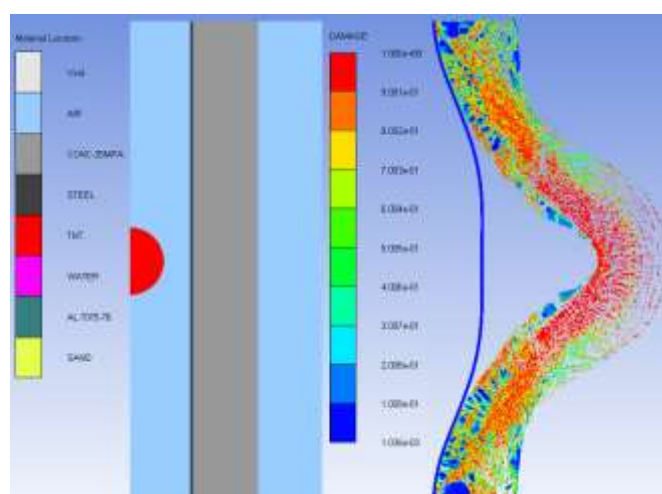


Figura 6. Modelo e seção danificada da parede de concreto após a explosão, S3.

No modelo S3 (Figura 6), foi utilizada uma única chapa de aço de 10 mm de espessura distante 3 mm do elemento de concreto. Em termos de espessura de aço, este modelo é equivalente ao S2, entretanto possui menos trocas de interface de material. A solução do modelo S3 apresentou resultados similares ao S2, isto indica que proteções posicionadas muito próximas de alvo, podem não protegê-lo adequadamente, uma vez que a energia que se propaga através da deformação do material de proteção será transmitida mecanicamente para o elemento que se

deseja proteger. Em ambos os casos, não se pôde constatar a eficiência da troca de impedância na mitigação do dano.

O modelo S4 (Figura 7) é semelhante aos modelos anteriores quanto à massa de explosivo e ao elemento de concreto. Entretanto, neste modelo, as duas chapas de aço foram posicionadas a 50 mm e 100 mm do concreto, respectivamente. Esta configuração habilitou um espaço maior para deformação das chapas de aço, em contrapartida a chapa mais distante do concreto ficou em contato com a carga de explosivo.

No elemento de concreto mostrado na Figura 7, é possível observar uma região de concreto íntegra na proximidade dos apoios. Isto indica que neste caso houve uma redistribuição da energia da explosão, mitigando, mesmo que de forma pouco incisiva, o dano da causado. Isto está relacionado ao maior espaço dado para deformação do aço que atenuou parte da energia a ser transmitida conservando, desta forma, as regiões de concreto mais afastadas do centro.

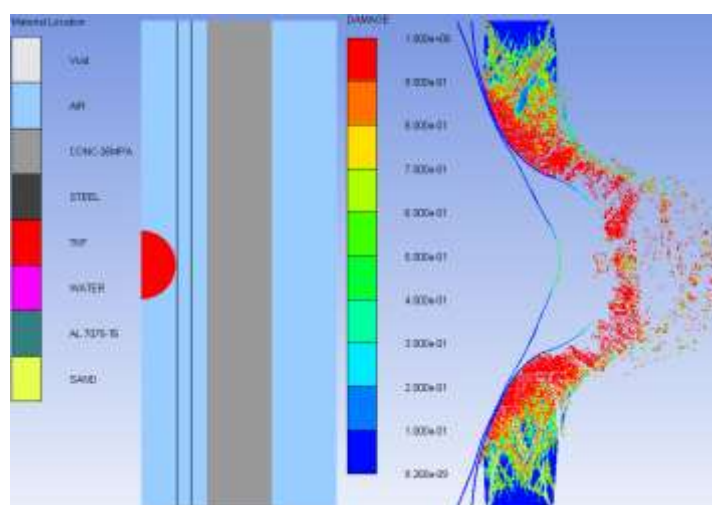


Figura 7. Modelo e seção danificada da parede de concreto após a explosão, S4.

O modelo S5 (Figura 8) é similar ao modelo S4, a diferença consiste no espaço entre as chapas de aço que em S5 foi preenchido por areia seca. O preenchimento por material poroso de baixa densidade tem como objetivo auxiliar na dissipação da energia da onda de choque. Em síntese, a onda de choque ao se propagar em um material poroso se divide em duas fases uma mais rápida transmitida pelo sólido e a outra mais lenta pelo gás, dada as muitas interações de interface dentro do material a onda de rarefação ocorre muito rapidamente, atenuando o pico da tensão total, Kazemi-Kamyab et al (2011).

Avaliando os resultados de S5 é possível perceber uma melhora discreta quanto à atenuação da energia da onda e proteção do elemento de concreto. É provável que o aumento da espessura das chapas e da camada de areia aumente a eficiência deste modelo, entretanto são necessárias mais análises para que se possa avaliar o custo-benefício deste tipo de medida.

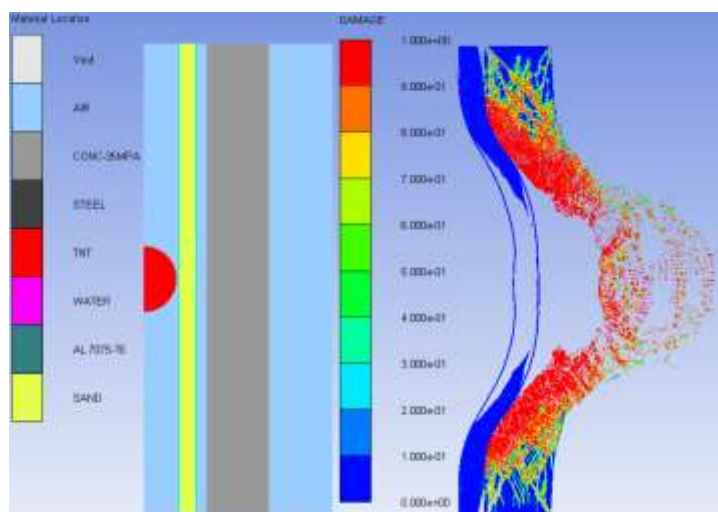


Figura 8. Modelo e seção danificada da parede de concreto após a explosão, S5.

O modelo S6 (Figura 9) é similar ao modelo S5, a diferença está no fato de que a chapa mais distante do concreto é de alumínio. Adotou-se o alumínio como o material da chapa mais próxima da explosão pelo fato da sua resistência ao cisalhamento ser inferior à do aço, apesar do módulo de elasticidade ser relativamente similar. Com isso, o objetivo é que esta funcionasse como material de sacrifício, escoando e absorvendo parte importante da energia da onda sob a forma de deformações inelásticas.

Como previsto na elaboração do modelo, a chapa de alumínio apresentou um nível de deformação superior ao da chapa de aço no caso anterior. Apesar de ter funcionado dentro do esperado, esta medida ainda não foi suficiente para manter íntegra uma maior parte região de concreto. A elevada magnitude das tensões provocadas por uma explosão por contato tornam difícil a elaboração de sistemas para proteção, entretanto, foi possível observar ganhos progressivos em cada modelo quanto a absorção da energia da explosão.

Estes resultados se enquadram na tendência das pesquisas atuais em utilizar materiais combinados e painéis tipo sanduiche para mitigação dos danos de uma explosão. Visto que as

explosões por contato são as mais destrutivas, são necessárias mais pesquisas nesta área para que se possa apresentar uma solução eficiente para o problema.

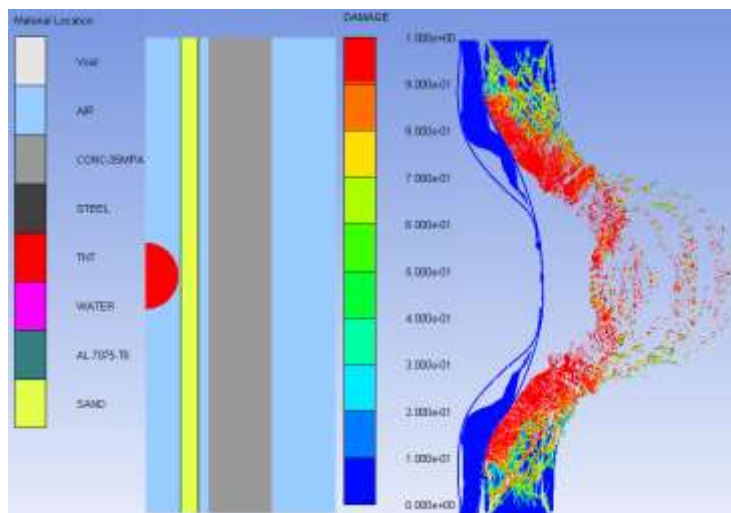


Figura 9. Modelo e seção danificada da parede de concreto após a explosão, S6.

5 Conclusões

Neste trabalho foram realizadas simulações utilizando um software baseado em fluidodinâmica computacional, o *Autodyn*. Através dele foram criados modelos para o estudo das pressões de onda de choque em diferentes meios e a avaliação da transmissão da energia do choque entre diferentes materiais.

Com relação ao primeiro grupo de simulações, é possível afirmar que os resultados quanto à sobrepressão de onda de choque se aproximam bastante daqueles obtidos através do uso das fórmulas de predição baseadas em resultados experimentais.

Considerando a influência do tamanho da malha na precisão dos resultados, as malhas com dimensões iguais ou inferiores a 1 mm apresentaram bom desempenho. É importante salientar que para distâncias em escala elevadas os resultados obtidos tanto numericamente quanto os estimados através de fórmulas empíricas tendem a convergir rapidamente.

No segundo grupo de simulações foi avaliada a transmissão da energia da onda de choque através da análise dos danos em um elemento de concreto submetido a detonação e 8kg de TNT a 200 mm de distância. Foram observados desempenhos diferenciados para cada tipo de proteção adotado entre o explosivo e o alvo.

Para o caso sem proteção todo o elemento de concreto falhou ao cisalhamento, inclusive a região de ligação dos apoios, confirmando a potência da carga detonada em relação à resistência do elemento. A partir disso, foram propostos diferentes nível de proteção para avaliar o desempenho quanto a absorção da energia da onda e como ela estava sendo transmitida ao elemento de concreto.

Observou-se que chapas de aço posicionadas em uma das faces do concreto não são suficientes para protegê-lo, visto que as tensões serão transmitidas mecanicamente através do contato das interfaces. Neste caso, a pequena camada de ar entre as chapas não foi suficiente para reduzir o nível de tensão através da mudança da impedância.

Baseado nos resultados dos primeiros modelos, nas simulações posteriores as chapas estavam mais distanciadas do elemento de concreto e fez-se uso de areia seca como material de preenchimento entre as chapas. Com isso, esperava-se que houvesse uma maior absorção de energia da onda antes que esta atingisse o elemento de concreto.

O dano causado ao elemento de concreto foi reduzido para os casos em que se usou areia como material de preenchimento, isto fica visível ao se analisar o concreto próximo da região dos apoios. Como se trata de um caso de uma explosão muito próxima, tendo as chapas em contato com o explosivo, é muito difícil dissipar toda esta energia com tão pouca distância disponível. Todavia, foram observados ganhos progressivos em cada modelo quanto a absorção da energia da explosão. É importante ressaltar que o elemento alvo simulado era composto por um concreto comum não armado e não foi submetido ao confinamento por chapas, isto reduziria parte do dano causado.

Os resultados mostraram que a utilização de materiais porosos de baixa densidade como material de preenchimento entre as chapas metálicas pode ser adequada para mitigação do dano, considerando inclusive o baixo custo envolvido. Entretanto, as explosões por contato são as mais problemáticas e destrutivas, representando atualmente uma das fronteiras no estudo da proteção estrutural. Por conta disso, são necessárias mais pesquisas nesta área para que se possa obter uma solução mais efetiva contra este tipo de evento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo incentivo à pesquisa realizada neste trabalho.

Referências

- Abdelalim, O. (2013). Blast Hazard Mitigation through Vented Suppressive. Ph. D. Thesis, Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada.
- Ambrósio, J., Ferreira, R., Mendes, R., Campos, J., Santos, P. M. S., Duarte, B. P. M., Oliveira, N. M. C. (2013). Prediction and experimental results of confined underwater blasting generators, 44th International Conference of the Fraunhofer ICT, Germany.
- ANSYS Autodyn Interactive Non-Linear Dynamic Analysis software version 15. (2014). User's Manual, SAS IP Inc, USA.
- Applied Technology Council (ATC), Hinman, E. (2003). Primer for Design of Commercial buildings to Mitigate Terrorist Attacks, Federal Emergency Management Agency, United States.
- Chock, J. M. K. (1999). Review of Methods for Calculating Pressure Profiles of Explosive Air Blast and its Sample Application. M Sc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.
- Codina, R. H., Ambrosini, D., Borbón, F. M. (2016). Columnas sometidas a explosiones de campo cercano, XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Assunção, Paraguai.
- Esteban, B., Gebbeken, N. (2016). A comparison of numerical modelling strategies in contact detonation scenarios with concrete targets, *Int. J. Comput. Methods Exp. Meas.*, v. 4, n. 3, p. 231–246.
- Gebbeken, N., Ruppert, M. (2000); A new material model for concrete in high-dynamic hydrocode simulations, *Arch. Appl. Mech.*, v. 70, n. 7, p. 463–478.
- Glasstone, S., Dolan, P. J. (1977). The effects of nuclear weapons, United States Department of Defense, USA.
- Herrmann, W. (1969). Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. *J. Appl. Phys.*, v. 40, n. 6, p. 2490–2499.
- Jha, N. Kumar, B. S. K. (2014). Under Water Explosion Pressure Prediction and Validation Using ANSYS/AUTODYN, *International Journal of Science and Research*, v. 3, n. 12, p. 1162-1166.

- Kazemi-Kamyab, V., Subramaniam, K., Andreopoulos, Y. (2011). Stress transmission in porous materials impacted by shock waves, *Journal of applied Physics*, v. 109, n. 1, 109:013523.
- Kinney, G. F., Graham, K. J. (1985). *Explosive Shocks in air*, Springer Science+Business Media, New York, USA.
- Krauthammer, T. (2008). *Modern Protective Structures*. CRC Press, Florida, USA.
- Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D. (2008). Evaluating the effect of underground explosions on structures. *Mecánica Comput.*, v. 27, p. 1999–2019.
- Luccioni, B. M., Araoz, G. F., Labanda, N. A. (2013). Defining Erosion Limit for Concrete. *Int. J. Protective structures*, v. 4, n. 3, p. 315–340.
- Monti, R. (1970) Normal shock wave reflection on deformable walls. *Meccanica*, v. 5, n. 4, p. 285-296.
- Moon, N. N. (2009). *Prediction of Blast Loading and its Impact on Buildings*. MTech. Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, India.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J. (2007). Blast Loading and Blast Effects on Structures. *Electronic Journal of Structural Engineering*, Special Issue, p.76-91.
- Nyström, U., Gylltoft, K. (2009). Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading, *Int. J. Impact Eng.*, v. 36, n. 8, p. 995–1005.
- Remennikov, A. M., Uy, B. (2014). Explosive testing and modelling of square tubular steel columns for near-field detonations, *J. Constr. Steel Res.*, v. 101, p. 290–303.
- Remennikov, A. M., Mentus, I., Uy, B. (2015). Explosive breaching of walls with contact charges: theory and applications, *Int. Journal of Protective Structures*, v. 6, n. 4, p. 629–647.
- Robertson, N., Hayhurst, C. Fairlie, G. (1994) Numerical simulation of impact and fast transient phenomena using Autodyn 2D and 3D. *Nuclear Engineering and Design*, v. 150, n. 3, p. 235-241.
- Shen, J., Ren, X. (2013). Experimental Investigation on Transmission of Stress waves in Sandwich Samples Made of Foam Concrete. *Defence Technology*, v. 9, n. 2, p. 110-114.
- Showichen, A. (2008). Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions. Ph. D. Thesis, Cranfield University, College of Defence Management and Technology, UK.

Siba, F. (2014). Near-Field Explosion Effects on reinforced Concrete Columns: An Experimental Investigation. M Sc. Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada.

Smith, P. D. Hetherington, J. (1994). Blast and Ballistic Loading of Structures, Butterworth-Heinemann, Oxford, England.

Usmani, Zeeshan-ul-Hassan. (2012). Explosions Modeling – A Tutorial, Autumn Simulation Multi-Conference, The Society for Modeling & Simulation International, San Diego, USA.

Yue, S., Qiu, Y., Zhang, N., Wang, M. (2017). Analytical study of local damage on concrete slab subjected to a contact explosion, Journal of Vibroengineering, v.19, n.2, p. 908-929.

NUMERICAL STUDY OF SHOCK WAVE OVERPRESSURES AND TRANSMISSION

Abstract

Researches about explosions and shock waves are important due to its applicability in several productive sectors, such as industry, mining and engineering. Accidental or criminal detonation of chemical explosives, such as TNT, may be a risk to civilian facilities and its users. The generated overpressures and the shock wave propagation through the medium are affected by properties and conditions of that medium. This article presents a general overview of the characteristics of the explosions in different environments, also, the effects of shock wave transmission through different materials was evaluated. The simulations developed in this work was modeled in a computational fluid dynamics software, Autodyn. The simulated models were divided into two groups, the first is related to the study of the explosion in different medium and the second was developed to evaluate the transmission of shock wave energy through different materials. The results obtained were analyzed and compared with blast wave predictions from other authors and evaluated critically. These results provided an important basis for further investigations.

Keywords: Explosions, Shock waves, Computational fluid dynamics

Conclusion

In the present contribution, simulations using the software Autodyn were made. In that software, numerical models were developed to do an evaluation of the shock wave overpressure and an analysis of the shock wave transmission through materials.

The results from the first group of simulations presented the good prediction capabilities of the numerical models in comparison with the empirical formulations. It's possible to conclude that empirical formulations have a reasonable accuracy and may be used for an initial analysis of the blast loading. The mesh size influenced the results, it was observed that meshes of 1 mm or more refined can be suitable used to evaluate explosions in a unidimensional analysis. The numerical and empirical results in terms of shock wave overpressure both to air and water presented a good convergence for greater scaled distances.

In the second group of simulations, the transmission of shock wave energy was evaluated by the analysis of the damage in a concrete element subjected to detonation of 8 kg of TNT positioned at 200 mm. For each kind of protection was observed differentiated performance. In the first case (direct explosion), all concrete element failed due shear, the high magnitude of the loading can be observed in the region next to the supports. Considering these conditions, different kinds of protection were applied in order to evaluate the energy transmission of the shock wave.

It was observed that steel plates positioned on the front surface of concrete element wasn't given a suitable protection, because the stress was mechanically transmitted through the materials due the surface interaction. In this case, a thin air interface between the solid materials, that promotes a mechanical impedance change, didn't effectively reduced the transmitted stress levels.

Based in the results from the first models, in the further models, the distance between the steel plates and the concrete element was increased. A layer of sand was used too. In these cases, it was observed that damage level in the concrete element was reduced as can be observed in the concrete region next to the supports. Considering close explosions, it's hard to provide some suitable protective systems considering the short distance between the charge and the target. Despite these difficulties, the simulations showed a progressive gain of performance, in terms of energy absorption, in each successive model. The use of a reinforced concrete element or confined concrete may present a better behavior under these same conditions.

The results showed that use of porous materials as fill material between metallic plates may be suitable for damage mitigation purposes. But, due the complexity of this kind phenomena, further researches related to close and contact blasts are necessary to achieve an effective protection system to buildings and structural elements.