

ANÁLISE COMPUTACIONAL DA PERFURAÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO POR EXPLOSIVOS

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

Resumo

As técnicas de perfuração de elementos de concreto pela detonação de explosivos em sua superfície têm se tornado alvo de muitas pesquisas atualmente, principalmente por conta da aplicabilidade nas áreas de demolição e de segurança estrutural. Neste âmbito, este trabalho apresenta um estudo numérico de placas de concreto submetidas à detonação de um explosivo cilíndrico a base de C4 em sua superfície. Os diferentes modelos numéricos foram desenvolvidos no software de fluidodinâmica computacional Autodyn® tendo como base experimentos elaborados por outros autores. Os resultados foram avaliados em termos de dano causado, em que se buscou relacionar as dimensões do explosivo com o padrão de dano produzido. Foi possível observar que há uma influência significativa das dimensões do explosivo no padrão de dano causado, mesmo que a massa do explosivo seja a mesma. Desta forma verificou-se que uma maior área de contato do explosivo com a placa de concreto é mais efetiva, em termos de furo produzido, do que grandes espessuras de explosivo. Deverá ser analisada em estudos posteriores uma relação otimizada entre dimensões da região contato e da espessura de explosivo que maximizem a eficiência da explosão.

Palavras-chave: Explosões, Ondas de Choque, Fluidodinâmica Computacional, Concreto

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

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

Campus Darcy Ribeiro, SG-12, primeiro andar, 70910-900, Brasília, Brasil

1 Introdução

Geralmente, a demolição de edifícios e a invasão de perímetros são realizadas com o auxílio de explosivos, principalmente pela detonação deles em contato com a superfície do elemento de concreto (*breaching*). O risco envolvido e a necessidade de mais informações sobre este tipo de evento contribuíram para que ele tenha se tornado objeto de estudos recentes.

Entre esses estudos, pode-se indicar os trabalhos de Tanaka e Tuji (2003) que avaliaram a influência da armação em elementos de concreto submetidos a uma explosão, Morishita e Tanaka (2005) que avaliaram os efeitos de múltiplas detonações em placas de concreto e Akers et al. (2005) que desenvolveram experimentos e procedimentos numéricos visando avaliar o dano causado em paredes de concreto armado pela detonação de dispositivos explosivos à base de C4 posicionados em sua superfície.

Contribuições recentes como a de Remennikov et al. (2015) avaliaram os aspectos teóricos das explosões por contato, apresentando uma formulação para predição do dano deste tipo de evento. Também é importante mencionar o trabalho de Yue et al. (2017) que desenvolveram um estudo analítico para avaliar os aspectos do dano em uma placa de concreto, considerando um explosivo à base de TNT e de formato esférico.

Estudos experimentais de eventos envolvendo explosões ou impactos podem ser custosos e arriscados, por conta disso, a fluidodinâmica computacional surge como uma alternativa eficiente e segura para trabalhar com este tipo de fenômeno. Trabalhos como os de Esteban e Gebbeken (2016) e Li et al. (2017) servem para demonstrar a grande aplicabilidade deste tipo de ferramenta.

Este trabalho apresenta um estudo numérico envolvendo a detonação de explosivos sobre uma placa de concreto. O objetivo foi avaliar o padrão e nível de dano na placa submetida à detonação de um explosivo cilíndrico com diferentes razões entre altura e diâmetro. Além disso, foi avaliada a influência do refinamento da malha nos resultados e as possíveis vantagens do posicionamento de uma armadura no concreto para mitigação do dano.

Os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho foram baseados nos experimentos desenvolvidos por Beppu et al. (2010).

2 Fundamentos das explosões por contato

Na ciência das explosões, além da massa do explosivo, a distância até o alvo, constitui um parâmetro importante na análise do evento e numa possível predição dos danos a serem causados. O comportamento, em termos de dano, das explosões próximas difere bastante daqueles advindos de

explosões à médias ou longas distâncias, já que nestas últimas a pressão produzida tende a englobar toda a estrutura e carregá-la de forma mais uniforme, enquanto que nas explosões próximas é esperado um dano mais localizado.

Considerando as explosões por contato no concreto, um elevado nível de tensão é transmitido ao elemento estrutural pelos produtos de detonação originando efeitos localizados de esmagamento e fragmentação. Estes efeitos relacionados com a capacidade destrutiva do explosivo aplicado podem ser sintetizados pela terminologia potência do explosivo (brisança), Mays e Smith (1995). A Figura 1 ilustra o padrão de dano esperado para explosões deste tipo.

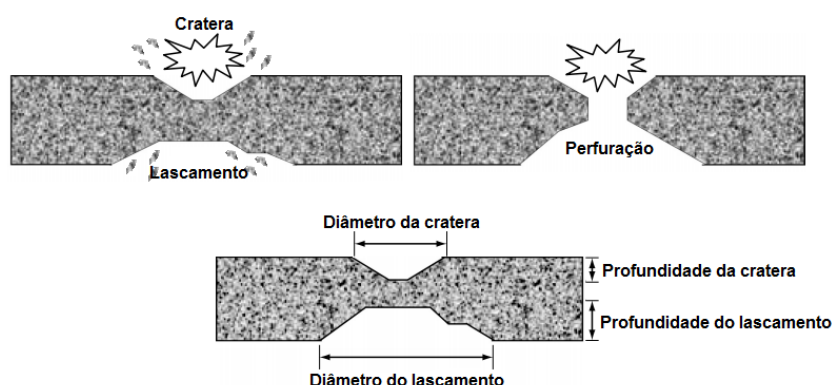


Figura 1. Padrão de dano e medidas importantes para explosões por contato, Beppu et al. (2010)

Basicamente, quando uma onda de choque produzida por uma explosão interage com a superfície de uma parede de concreto, por exemplo, parte da energia da onda é refletida devido à diferença entre as impedâncias mecânicas e a outra parte se propaga através do material como uma onda de tensão. A onda de tensão irá se propagar pela parede até atingir a face posterior e ser refletida, esta segunda reflexão resulta em tensões de tração na face posterior, provocando o lascamento do concreto. O concreto fragilizado irá falhar devido às tensões de tração e seus fragmentos serão projetados da parte de trás da parede Millard et al. (2010).

Numa explosão por contato, o material da estrutura fica exposto prioritariamente ao carregamento advindo dos produtos de detonação cuja pressão inicial no processo é a mesma da detonação, ou seja, é de cerca de 21 GPa, Remmenikov e Uy (2014).

3 Modelagem numérica

3.1 O Autodyn

A ferramenta numérica utilizada neste trabalho foi Ansys Autodyn ® (2014) do pacote Ansys Workbench. Trata-se de uma ferramenta de análise explícita desenvolvida especificamente para lidar com problemas dinâmicos não lineares como a modelagem de penetração, impacto e explosões.

Nos hidrocódigos, como o Autodyn ®, a dinâmica do contínuo é descrita a partir de um conjunto de equações diferenciais baseadas nos princípios de conservação de massa, movimento e energia. Nesse contexto, na discretização do problema, ainda são aplicadas uma equação de estado que relaciona a densidade e a energia interna com a pressão e uma relação constitutiva que, basicamente, relaciona a tensão no material com a distorção deste, Anderson Jr. (1987).

3.2 Modelos Numéricos

Os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho consistem na modelagem de uma placa de concreto simples submetida à detonação de um dispositivo cilíndrico de C4 sobre sua superfície, conforme o experimento realizado por Beppu et al. (2010). A placa de concreto, suportada em suas extremidades por dois perfis de aço de seção H, apresenta 500 mm de lado e 80 mm de espessura e foi submetida à detonação de 46g de C4 apoiado no centro da placa.

O explosivo utilizado nos experimentos é de formato cilíndrico com uma razão entre a espessura e diâmetro do explosivo igual a 1. As dimensões deste explosivo não foram fornecidas pelo autor, por conta disso, para o cálculo delas foi considerada uma densidade para o C4 de 1,6 g/cm³, Ansys Autodyn ® (2014). Este valor é similar ao apresentado por Dobratz (1972) e comumente considerado em catálogos de explosivos de demolição.

Ao todo foram elaborados seis modelos, considerando explosivos cilíndricos à base de C4 com diferentes relações entre diâmetro e altura, buscou-se avaliar o padrão de dano causado em uma placa de concreto e a influência da geometria do explosivo no padrão de dano causado. Especificamente, no primeiro e o segundo modelos, que são similares ao experimento base, verificou-se a influência do refinamento da malha nos resultados.

A Figura 2 apresenta uma comparação entre o experimento realizado por Beppu et al. (2010) e o modelo numérico desenvolvido no Autodyn.

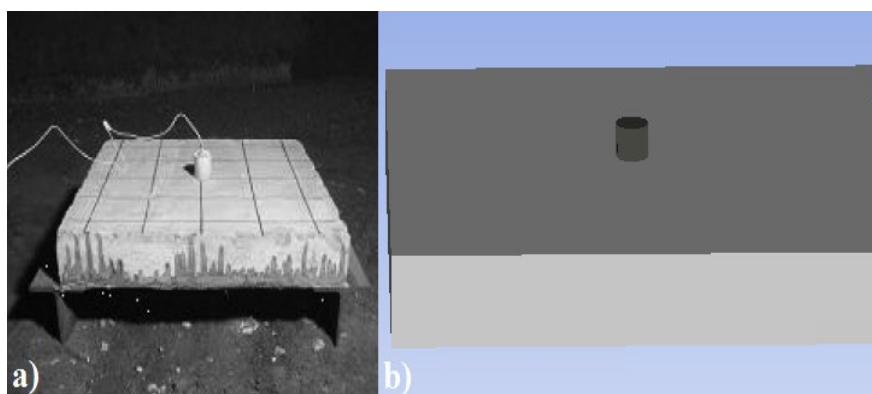


Figura 2. a) Experimento desenvolvido por Beppu et al.(2010), b) modelo numérico desenvolvido no Ansys Autodyn ® (2014).

A Tabela 1 apresenta uma síntese de todas as simulações realizadas.

Tabela 1 – Síntese dos modelos simulados

Modelo	Refinamento da malha (mm)	Razão diâmetro/espessura do explosivo C4 (cilindro)	Armação (mm)		Na modelagem realizada no Autodyn, optou-se por elementos
			Diâm. da barra	Esp.	
Primeiro modelo	5	1,0	-	-	
Segundo modelo	1	1,0	-	-	
Terceiro modelo	1	10,5	-	-	
Quarto modelo	1	0,1	-	-	
Quinto modelo	1	204,0	-	-	
Sexto modelo	1	1,0	5	25	

Lagrangeanos na definição dos sólidos e Eulerianos para os fluidos como o ar, por exemplo. A dimensão das malhas utilizadas nos modelos é apresentada na Tabela 1.

De modo a simular a explosão e o processo de combustão do explosivo de forma adequada foi necessária a modelagem do ar ao redor da placa de concreto. Em todos os modelos o elemento de ar possui 520 mm de lado, entretanto, sua espessura está vinculada à geometria do explosivo inserido, quanto mais espesso o explosivo maior a espessura de ar necessária para englobar todo o modelo. As dimensões exatas dos explosivos podem ser obtidas a partir da Tabela 1, considerando que a massa de C4 é a mesma em todos os casos (46 g) e que sua densidade é de 1,6 g/cm³.

O ponto de início da reação de detonação do explosivo foi posicionado no centro de sua face superior. A malha utilizada em todos os explosivos simulados foi de 1 mm.

A condição de contorno *FlowOut* foi empregada no elemento de ar de modo que este simulasse um ambiente contínuo, ou seja, sem reflexões de onda na fronteira do elemento.

3.3 Modelando materiais no Autodyn

A definição de um material no Autodyn está vinculada à definição de quatro propriedades: as equações de estado, o modelo de resistência do material, o modelo de falha do material e o modelo de erosão.

As equações de estado (*EOS*) caracterizam o estado do material, considerando os efeitos de mudança de densidade e processos termodinâmicos. Nelas, é definida a pressão como função da densidade e da energia interna.

Os modelos de resistência devem ser utilizados nos hidrocódigos quando os efeitos de resistência do material simulado não podem ser ignorados. Estes modelos definem os critérios de escoamento, tendo as relações que englobam os regimes elástico e plástico de um material.

Os modelos de falha se aplicam aos materiais que já atingiram seu nível de tensão limite, esses modelos alteram a forma como o material passa a ser tratado, descrevendo as propriedades deste quando o mesmo não apresenta mais resistência.

O último dos modelos a ser considerado são os modelos de erosão que, ocasionalmente podem ser desabilitados em algumas simulações. Cabe a estes modelos regular as grandes distorções apresentadas pela malha Lagrangeana (comumente utilizada na modelagem dos sólidos), Luccioni e Araújo (2011).

Neste trabalho, o critério de erosão aplicado no concreto foi o de deformação geométrica instantânea efetiva com um limite de 0.5, consideração similar à empregada por Codina et al. (2016) em seu trabalho sobre explosões.

3.4 Modelos constitutivos

Para a elaboração dos modelos foi necessária a utilização de materiais como o ar, C4, concreto e aço.

A equação de estado de gás ideal foi utilizada para o ar, Eq. 1.

$$P = (\gamma - 1)\rho e \quad (1)$$

Na equação anterior, γ é o expoente adiabático, ρ é a massa específica do ar e e é a energia interna. As condições de contorno empregadas no ar permitiam a simulação de um meio contínuo, dessa forma quando a onda de choque atingia a fronteira do modelo ela não era refletida.

Para descrever o processo de combustão e expansão dos produtos de detonação do C4, foi utilizada a equação de estado JWL, Eq. 2.

$$P_h = C_1 \cdot \left(1 - \frac{\omega_{co}}{R_1 V_e}\right) e^{-R_1 V_e} + C_2 \cdot \left(1 - \frac{\omega_{co}}{R_2 V_e}\right) e^{-R_2 V_e} + \frac{\omega_{co} E_i}{V_e} \quad (2)$$

Em que, P_h é a pressão hidrostática, C_1 , C_2 , R_1 , R_2 e ω_{co} são constantes obtidas empiricamente relacionadas com o tipo de explosivo utilizado, V_e é a razão entre o volume específico do produto de detonação e o volume específico do explosivo não detonado e E_i é a energia interna específica.

Para a modelagem do concreto foi utilizada a equação de estado P-alpha, Herrmann (1969), sendo adotado o modelo RHT para definição da resistência e falha.

Considerando que quando um material poroso, submetido a um determinado nível de pressão hidrostática começa a se deformar plasticamente, sua densidade se modifica e, durante esse processo, uma certa quantidade de energia é absorvida, é necessária uma equação de estado que englobe este fenômeno, Hartmann et al (2010).

Deste modo o uso da equação de estado P-alpha é interessante, pois permite uma boa representação do comportamento de materiais porosos submetidos a elevados níveis de tensão, Luccioni et al (2013). Esta equação de estado para materiais totalmente compactados para $p \geq 0$ e $p < 0$ é apresentada nas formulações mostradas nas Eq.3 e Eq. 4, respectivamente. A Eq.5 apresenta esta equação de estado considerando um material poroso ($p \geq 0$):

$$p = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e \quad (3)$$

$$p = T_1 \mu + T_2 \mu^2 + B_0 \rho_0 e \quad (4)$$

$$p = A_1 \bar{\mu} + A_2 \bar{\mu}^2 + A_3 \bar{\mu}^3 + (B_0 + B_1 \bar{\mu}) \rho_0 e \quad (5)$$

Em que, p é a pressão, ρ_0 é a densidade inicial, A_n , B_n e T_n são coeficientes definidos para o material analisado, e é a energia interna, μ é a alteração relativa de volume para os casos de material totalmente compactado e poroso.

A equação de resistência Johnson-Cook foi utilizada para descrever o comportamento do aço. Este modelo é largamente utilizado para representar materiais submetidos a grandes deformações e taxa de deformação, bem como altas temperaturas, Showichen (2008). No modelo de Johnson-Cook a tensão de escoamento (σ_e) é dada pela Equação 6, Westerling (2004).

$$\sigma_e = (A_{jc} + B_{jc} \varepsilon_p^{n_{jc}}) (1 + C_{jc} \ln(\dot{\varepsilon}_p^*)) (1 - T_H^{m_{jc}}) \quad (6)$$

Na qual ϵ_p é a deformação plástica, $\dot{\epsilon}_p^*$ é a taxa de deformação plástica e T_h é uma função linear da temperatura, escalonada de modo ser 0 na temperatura ambiente e 1 no ponto de fusão. A_{jc} , B_{jc} , η_{jc} , C_{jc} e m_{jc} são parâmetros do material.

Os apoios utilizados no experimento, foram aplicados no modelo numérico como condições de contorno que restringiam o movimento vertical das extremidades.

3.5 Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados neste grupo de simulações são mostradas nas tabelas 2, 3, 4 e 5.

Ar	
γ	1,4
Massa específica	0,001225 g/cm ³
Temperatura de referência	288,2 K
Calor específico	717,599976 J/kgK

Tabela 2 – Propriedades do ar

Aço	
Densidade de referência	7,85 g/cm ³
Módulo volumétrico	1,40.10 ⁸ kPa
Calor específico	477 J/kgK

Tabela 3 – Propriedades do C4

C4	
Massa específica	1,601 g/cm ³
C ₁	6,0977 10 ⁸ kPa
C ₂	1,295 10 ⁷ kPa
R ₁	4,5
R ₂	1,4
ω _{co}	0,25
Velocidade de detonação	8,193001 10 ³ m/s
Energia C-J	9,000001 10 ⁶ kJ/m ³
Pressão C-J	2,080000 10 ⁷ kPa

Tabela 4 – Propriedades do Concreto

Concreto	
Massa específica	2,50 g/cm ³
Resistência à compressão	28,9 MPa
Calor específico	654 J/kgK

Tabela 5 – Propriedades do aço

4 Resultados e Discussão

4.1 Análise da primeira e segunda simulações

Estas simulações permitem comparar inicialmente o desempenho numérico de duas malhas na representação do experimento desenvolvido por Beppu et al. (2010). A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos numericamente em comparação com os experimentais.

Tabela 6 - Comparação entre os resultados numéricos e os experimentais

Modelo	Diâmetro da cratera (mm)	Diâmetro do lascamento (mm)	Profundidade da cratera (mm)
Beppu et al. (2010)	130-160	210	20-28
1º Simulação	100	180	20
2º Simulação	106	200	20

Os resultados obtidos apresentam uma considerável precisão com os experimentais, ainda mais quando se considera a variabilidade encontrada no próprio experimento para definição do diâmetro da cratera, a região de interface entre os produtos de detonação e a superfície do concreto é crítica, talvez haja influência de fatores externos nessa parte específica que podem afetar os resultados, como a superfície irregular do concreto, por exemplo.

Os resultados para o diâmetro da região de lascamento e profundidade da cratera apresentaram uma ótima aproximação. As pequenas diferenças entre os resultados experimentais e os numéricos talvez estejam relacionadas às condições do concreto in loco ou com algumas especificações da simulação, por exemplo, um refinamento maior, provavelmente, traria resultados ainda melhores.

Outro aspecto importante é sobre o custo computacional das simulações, o hardware utilizado, tem como base um processador I5 de última geração de 64 bits, com 16 GB de RAM. Dentro dessas especificações, cada um dos modelos com malha de 1mm demandaram pouco mais de duas semanas de tempo de simulação.

A Figura 3 ilustra uma comparação dos modelos numéricos com os experimentais. Nesta figura e nas demais, é utilizada uma escala de dano (damage), em que 0 (cor azul) representa o material íntegro e 1 a falha completa (cor vermelha).

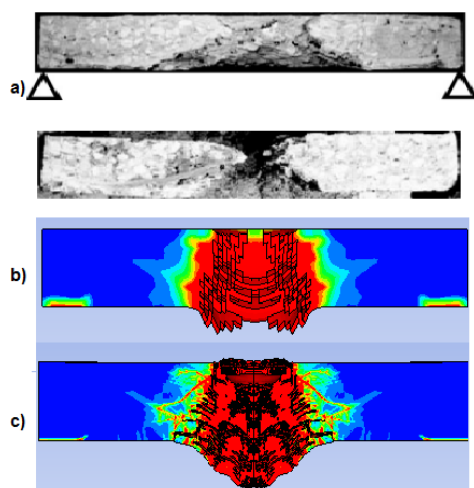


Figura 3. a) Beppu et al. (2010), b) 1º simulação e c) 2º simulação

Para este caso, ambas as malhas apresentaram uma boa reprodutibilidade dos resultados do experimento, entretanto, nas demais simulações desenvolveu-se por continuar com a aplicação da malha de 1mm.

4.2 Análise da variação da relação diâmetro/espessura do explosivo

Para esta análise foram consideradas a segunda, terceira, quarta e quinta simulações. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparação entre os resultados numéricos

Modelo	Razão diâmetro/espessura do explosivo	Diâmetro da cratera (mm)	Diâmetro do lascamento (mm)	Profundidade da cratera (mm)
2º Simulação	1,0	106	200	20
3º Simulação	10,5	166	236	35
4º Simulação	0,1	50	-	8
5º Simulação	204	224	328	38

Os resultados mostram a influência significativa que um simples rearranjo da geometria do explosivo pode ter no incremento de seu potencial destrutivo. Em termos de perfuração, o desempenho do explosivo com uma maior razão diâmetro/espessura foi superior à situação padrão, o que foi observado na terceira e quinta simulação.

A princípio, uma maior região de contato entre o explosivo e o alvo mostrou-se eficiente no aproveitamento da energia do explosivo para perfuração. Em comparação com a razão de 204, a razão de 10,5, mostrou ter uma melhor aplicabilidade, uma vez que, na prática, seria mais simples de ser

realizada. Além disso, a simulação com razão de 204 deixou regiões de concreto íntegro na região do furo, isso pode indicar que talvez esteja havendo perda da energia da explosão no processo de perfuração, não sendo esta, uma razão entre diâmetro e espessura ideal.

A quarta simulação comprovou que apenas o contato com a massa de explosivo não é suficiente para perfuração de uma placa, é importante uma disposição adequada entre as superfícies do explosivo e do alvo para que se obtenha o efeito desejado. Isto indica que, além da massa do explosivo, uma boa definição de sua geometria é fundamental para otimizar a aplicação da energia da explosão e melhorar o processo de perfuração.

A Figura 4 apresenta uma comparação entre os resultados. Fica perceptível que, apesar da massa de explosivo ser a mesma, a geometria do explosivo em uma explosão por contato exerce influência significativa no padrão de dano produzido.

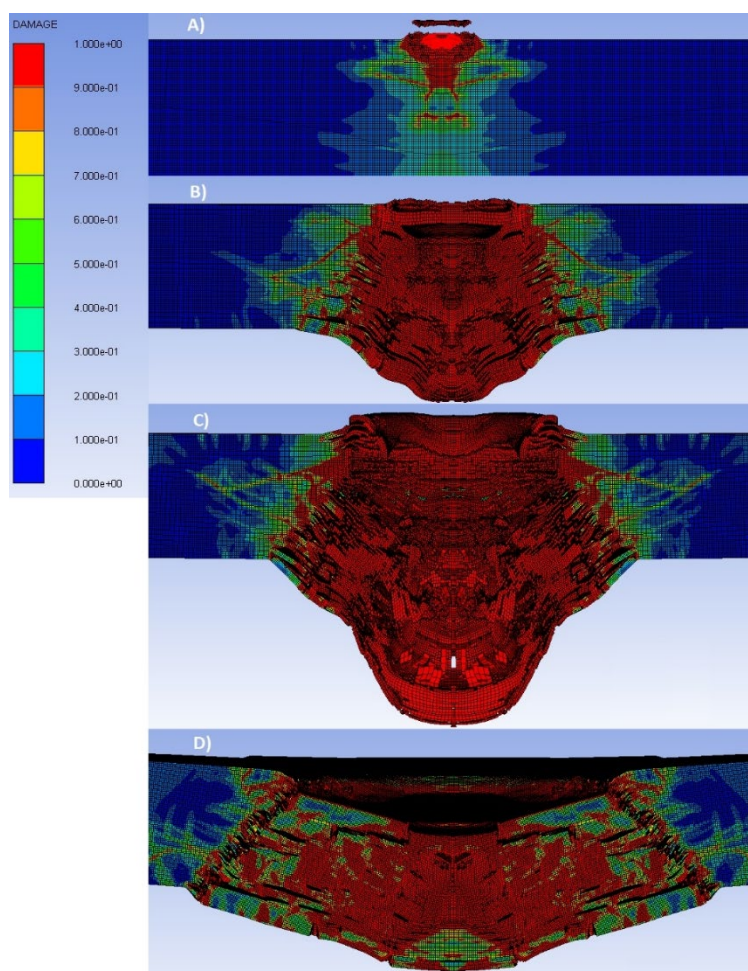


Figura 4. Simulações exibidas na ordem de nível de dano a) 4º Simulação, b) 2º simulação, e c) 3º simulação, c) 5º simulação.

4.3 Análise da influência da armação

Diferente do esperado, o posicionamento de uma armação, não exerceu influência significativa quanto à redução nos níveis de dano apresentados pelo concreto em termos de crateramento e lascamento, como pode ser observado na Figura 5. Os resultados foram praticamente idênticos aos observados na situação padrão (2ª simulação).

Contudo, aparentemente, houve uma restrição maior à movimentação da massa de concreto no interior do furo produzido, o que reduziu suas dimensões finais. Ainda assim os resultados indicam que técnicas para mitigação de dano em elementos de concreto submetidos a explosões próximas devem envolver a combinação de outros elementos, uma vez que uma simples armação pode não prover ao elemento reforço suficiente para o nível de segurança desejado.

Nesse ponto, é importante comentar sobre o trabalho de Tanaka e Tuji (2003) que estudaram elementos de concreto armado submetidos a uma explosão, considerando diferentes níveis de armação. Eles também observaram que não houve incremento significativo em mitigar os danos na região de crateramento e lascamento, pelo simples posicionamento de uma armadura.

Um aspecto importante a ressaltar sobre esta simulação é com relação à modelagem da armadura já que foram empregados elementos de volume de aço imersos no concreto, sendo o coeficiente de fricção de 0,7. Outras possibilidades, como a utilização de elementos tipo *BEAM*, poderão ser testadas no futuro de modo a verificar se há alguma influência significativa desta modelagem nos resultados finais quanto ao dano observado.

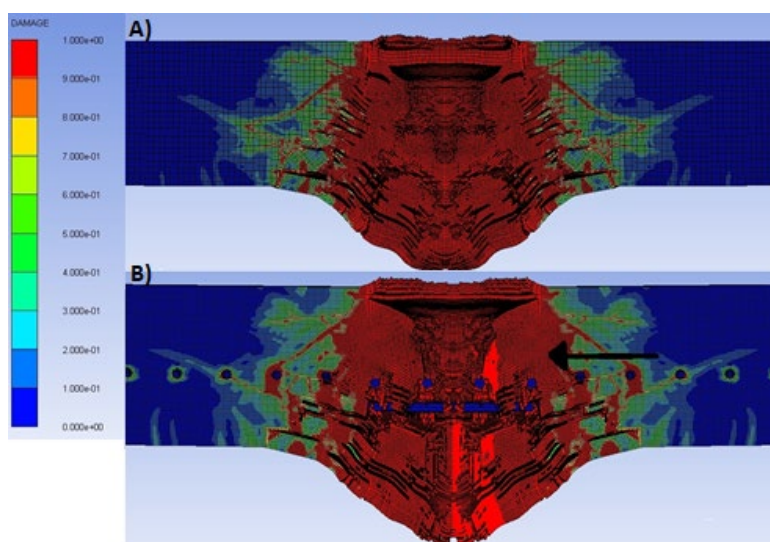


Figura 5. Comparação entre a segunda e sexta simulações.

5 Conclusões

Foi observado que malhas com refinamento de 5 mm e 1 mm apresentaram resultados similares entre si e com o experimento. Isto indica que, para o problema em análise ou outros similares, estas podem ser aplicadas sem maiores problemas com a precisão.

Com relação aos resultados referentes à geometria do explosivo, pode-se afirmar que há uma influência significativa da geometria do explosivo no processo de perfuração de placas de concreto em uma explosão por contato. Desse modo, verifica-se que apenas definir uma massa de explosivo em contato com a placa de concreto não é garantia da otimização do processo de perfuração.

Neste aspecto é importante mencionar que Luccioni et al. (2010) observaram que há uma influência significativa da geometria do explosivo na cratera produzida no solo após uma detonação. Isto indica, de certa forma, que comportamento similar pode ser observado em detonações sobre outros materiais como o concreto, por exemplo.

Ainda neste âmbito, considerando o parâmetro geométrico do explosivo na perfuração de placas, é possível admitir que exista uma relação ótima entre diâmetro/espessura de explosivo que maximize sua eficiência para perfuração da placa.

O posicionamento de uma armação no interior da placa de concreto mostrou não ser muito eficiente em mitigar os danos na região de crateramento e lascamento. Entretanto, observou-se que as dimensões finais do furo foram reduzidas, uma vez que a massa de concreto fragilizado teve sua movimentação limitada pela presença das barras.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo incentivo à pesquisa realizada.

Referências

- Akers, S. A., Weed, R., Rickman, D. D., Danielson, K. (2005). Numerical Simulations of Explosive Wall Breaching, Proceedings of the Users Group Conference, Computer Society, Denver.
- Anderson Jr., J. D. (1995). Computational Fluid Dynamics. McGraw-Hill series, New York.
- ANSYS Autodyn Interactive Non-Linear Dynamic Analysis software version 15. (2014) User's Manual, SAS IP Inc, USA.
- Beppu, M., Ohno, T., Ohkubo, K., Li, B. Satoh, K. (2010). Contac Explosion resistance of Concrete Plates Externally Strengthened with FRP Laminates. Int. Journal of Protective Structures, vol. 1, p. 257-270.
- Codina, R. H, Ambrosini, D. Borbón, F. M. 2016. *Columnas sometidas a explosiones de campo cercano*. XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Assunção, Paraguai.
- Dobratz, B. M. (1972) Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, Universidade da Califórnia, UCRL-51319, Laboratório Lawrence Livermore, EUA.

- Esteban, B., Gebbeken, N. (2016). A comparison of numerical modelling strategies in contact detonation scenarios with concrete targets, *Int. J. Comput. Methods Exp. Meas.*, vol. 4, n. 3, p. 231–246.
- Hartmann, T., Pietzsch, A., Gebbeken, N. (2010) A Hydrocode Material Model for Concrete, *International Journal of Protective Structures*, vol. 1, nr 4, pg 443-468.
- Herrmann, W. (1969) Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials, *J. Appl. Phys.*, vol. 40, nr. 6, pg 2490–2499.
- Li, J., Wu, C., Hao, H. and Su, Y. (2017) Experimental and numerical study on steel wire mesh reinforced concrete slab under contact explosion. *Materials & Design*, vol. 116, pg 77-91.
- Luccioni, B., Ambrosini, D., Chung Kim Yuen, S. and Nurick, G. (2010). “Effects of large and spread explosives loads”. *International Journal of Protective Structures*, vol. 1, nr.3, pp. 319-344.
- Luccioni, B. M., Araújo, G. (2011). Erosion Criteria for Frictional Materials Under Blast Load, *Mecânica Computacional*, vol. 30, p. 1809–1831.
- Luccioni, B. M., Araújo, G. F., Labanda, N. A. (2013). Defining Erosion Limit for Concrete, *Int. J. of Protective Structures*, vol. 4, nr. 3 , p. 315–340.
- Mays G, Smith P. (1995). *Blast Effects on buildings*, London: Thomas Telford, London.
- Millard, S. G., Molyneaux, T. C. K., Barnett, S. J., Gao, X. (2010). Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading, *Int. J. of Impact Eng.*, v. 37, nr. 4, pg 405–413.
- Morishita, M., Tanaka, H. (2005). Effects of multiple detonations on the damage of reinforced concrete slab. *JSCE*, Vol. 22, N.1, p. 55-60.
- Remennikov, A. M., Mentus, I., Uy, B. (2015). Explosive breaching of walls with contact charges: theory and applications, *Int. J. of Protective Structures*, vol. 6, no. 4, pg 629–647.
- Remennikov, A. M., Uy, B. (2014). Explosive testing and modelling of square tubular steel columns for near-field detonations, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 101, 290–303.
- Showichen, A. (2008). Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions. College of Defence Management and Technology, tese, Reino Unido.
- Tanaka, H., Tuji, M. (2003). Effects of Reinforcing on Damage of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Explosive Loading. *Concrete Research and Technology*, v. 14, n. 1, p.1-11.
- Westerling, L. (2004). Test of the Implementation of the Johnson-Cook Model in Autodyn. Swedish Defence Agency, Methodology report, Estocolmo.
- Yue, S., Qiu, Y., Zhang, N., Wang, M. (2017). Analytical study of local damage on concrete slab subjected to a contact explosion. *Int. Journal of Vibroengineering*, vol. 19, 908-929.

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF EXPLOSIVE BREACHING OF CONCRETE SLABS

Abstract

Commonly used by military operations, the explosive breaching of concrete targets became important in the last years and has been the target of recent investigations. Events involving explosions may be complex and dangerous, besides the influence of slab material properties, the mass, geometry and positioning of the explosive have important influence in the damage pattern. In this context, this work presents a numerical study of concrete slabs subjected to a contact detonation of a cylindrical C4 explosive. The simulated numerical models were based in the experiments developed by other authors and were modelled in the computational fluid dynamics software Autodyn ®. The results were evaluated in terms of damage pattern (cratering and spalling region). The results showed a significant influence of the explosive dimensions in the damage pattern of the concrete slab. It was verified that greater area of explosive contact is more effective, in terms of produced break-through hole, than greater thickness of explosive. In later studies, an optimized relationship between dimensions of contact region and the explosive thickness should be investigated in order to maximize the efficiency of the explosion.

Keywords: *Explosions; Contact explosion; Computational fluid dynamics.*

Introduction

This work presents a numerical analysis of explosive breaching of concrete slabs, the main objectives involve the evaluation of damage pattern and damage level of a concrete slab subjected to a contact explosion.

The numerical analysis is based in the work presented by Beppu et al. (2010), in addition to the base experiment was simulated numerical models using explosives with cylindrical shapes with different thickness and diameter ratios.

Numerical models

The numerical models developed in this work was developed in the Autodyn from Ansys Workbench ® (2014), all the numerical models consider a concrete slab subjected to a contact detonation of C4 explosive positioned over the slab surface.

More details about the numerical models can be seen in the Table 1.

Some material as air, C4, concrete and steel are used in order to develop the numerical models. The tables 2, 3, 4 and 5 show the properties of those materials.

Results and discussion

The first and second simulations showed good results that are very similar with the real experiment, as showed in Table 6. The advantage of 5 mm size mesh is the better computational speed for simulations, but the 1 mm mesh was used in all other models.

The second, third, fourth and fifth model was developed in order to analysis the explosive thickness and diameter ratios influence on the concrete slab damage pattern. The Table 7 shows the results for those simulations.

It's possible to see the high influence of the explosive geometry (relating thickness and diameter) on the explosive energy distribution over the slab, when the diameter/thickness ratio is high, better breaching results are observed.

An additional simulation (sixth) was developed in order to verify the influence of reinforcement in damage mitigation of the concrete slab, the Figure 5 show results. The results showed that reinforcement improved a little the slab strength against the breaching process, similar results were observed by Tanaka e Tuji (2003). At least, the reinforcement resulted in an additional resistance to reduce the hole propagation in the concrete.

Conclusion

It was observed that meshes refinements of 5 mm and 1 mm presented similar results between each other and with the experiment. This points that these refinements can be applied to similar problems without major accuracy problems.

The results related with explosive geometry showed a large influence of the diameter/thickness ratio of the explosive in the concrete breaching process. Therefore, the results points that the explosive mass isn't only unique parameter to develop an optimized explosive breaching design.

Considering the geometrical parameter of explosive that's involves diameter/thickness ratio, it is possible that there an optimal relation between these values that maximizes the efficiency of the detonation during a concrete breaching.

The reinforcement positioned inside the concrete slab showed a little influence to mitigate the damage on concrete due the breaching process, considering the damages related to crater region and spalling region. However, it was observed that the final hole dimensions were reduced when compared with unreinforced simulated models, this points that the steel bars of the concrete reinforcement limit the fractured concrete mass movement that may difficult the hole propagation.