

A numerical analysis of a concrete slab breaching using high explosives

Perfuração de placa de concreto por alto explosivo: uma análise numérica



M. L. COSTA NETO ^a
eng_murilolimeira@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8146-4883>

G. N. DOZ ^a
graciela@unb.br
<https://orcid.org/0000-0001-6428-4012>

Abstract

Explosive breaching of walls, demolition of buildings with high structural robustness and non-programmed explosions may be extremely dangerous, the high risk of these events demands continuous researches to support the development of optimized constructive techniques and design. In this context, this work presents a numerical study of the explosive breaching of concrete wall using an optimized contact explosive charge with cylindrical shape, the CFD software Autodyn ® Ansys was used. The results were evaluated in terms of damage pattern of the concrete slab, where was considered the cratering dimensions, the breakthrough hole and concrete spalling. A significant gain of the destructive potential of the explosive was observed by the simple rearrangement of its dimensions when compared to the base model, also the robustness of software to model and simulate a complex experiment that involves the detonation of a contact explosive charge was verified.

Keywords: explosion, concrete, computational fluid dynamics.


Resumo

Invasão de perímetros com explosivos, demolições de estruturas robustas e incidentes envolvendo explosões não-programadas podem ser extremamente perigosos. A gravidade destes eventos demanda estudos que possam levar a um conhecimento mais profundo do fenômeno explosão e de sua interação com elementos estruturais. Este trabalho apresenta uma análise numérica da otimização geométrica de um explosivo cilíndrico a base de TNT na perfuração de uma placa de concreto, utilizando o software Autodyn ® Ansys. Os resultados foram avaliados em termos do padrão de dano produzido na placa, sendo estudadas a profundidade e as dimensões da região da cratera e de lascamento. Quanto à proposta de otimização, observou-se um ganho importante no potencial destrutivo do explosivo pelo simples rearranjo de suas dimensões, também se constatou a aplicabilidade do software em se replicar numericamente um experimento envolvendo explosões por contato.

Palavras-chave: explosão, concreto, fluidodinâmica computacional.

^a Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, Brasil.

Received: 10 Mar 2018 • Accepted: 17 May 2018 • Available Online:

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

A detonação de explosivos em contato com elementos de concreto é comumente utilizada para invasão de perímetros por forças especiais ou para demolição de edificações, tendo aplicações tanto civis como militares. O risco envolvido e a necessidade de maiores informações sobre este tipo de evento fizeram com que este tenha se tornado objeto de estudos recentes, como, por exemplo, os desenvolvidos por [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] e [8].

Em todos esses estudos, se observa uma busca por uma maior compreensão dos efeitos de uma explosão próxima ou em contato com o alvo. É importante lembrar que este tipo de explosão constitui o tipo mais agressivo às estruturas.

Neste contexto de explosões próximas, a utilização da técnica de perfuração (*"breaching"*) costuma ser aplicada em variadas situações. O posicionamento adequado do explosivo ao longo do elemento a ser perfurado e a determinação de sua massa são fatores importantes quando se busca a aplicação otimizada da energia da detonação e a preservação da integridade dos elementos estruturais próximos a zona a ser perfurada.

Ainda com relação às explosões por contato, é importante citar as contribuições dos trabalhos de Akers et al. [2] 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. Remennikov et al. [9] avaliaram os aspectos teóricos das explosões por contato, apresentando uma formulação para predição do dano deste tipo de evento. Yue et al. [10] desenvolveram um estudo analítico para avaliar os aspectos do dano em uma placa de concreto, considerando um explosivo a base de TNT e de formato esférico.

Considerando o risco e o custo envolvidos em abordagens experimentais para o estudo deste tipo de fenômeno, as simulações numéricas surgem como alternativas eficientes e seguras. A utilização da tecnologia da fluidodinâmica computacional para modelagem de explosões, impactos e avaliação de dano é relativamente recente,

alguns trabalhos como os apresentados por [8], [11], [12], [13] e [14], por exemplo, demonstram a aplicabilidade deste tipo de recurso.

Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo numérico envolvendo a detonação de explosivos de geometria cilíndrica sobre uma placa de concreto simples, visando a avaliação de uma proposta de otimização energética da explosão para perfuração da placa.

A proposta apresentada foi desenvolvida com base nas formulações de predição de dano propostas por Remennikov et al. [9]. A partir delas, foi ajustada uma expressão para tornar possível relacionar o diâmetro do explosivo e sua espessura, considerando esta relação ao verificar a profundidade da placa a ser perfurada. Desse modo, consegue-se relacionar as dimensões da carga de explosivo com a espessura da placa a ser perfurada, podendo-se obter a relação mais eficiente.

Para verificar esta proposta, utilizaram-se os experimentos desenvolvidos por Beppu et al. [15] que consistem na detonação de uma carga cilíndrica de C4 sobre uma placa de concreto. É importante salientar que Remennikov et al. [9] também utilizou este mesmo trabalho experimental para verificar a aplicabilidade de sua proposição na predição de danos.

Por conta disso, em adição à proposta original do trabalho, é possível realizar uma comparação entre os resultados numéricos obtidos com os experimentais de Beppu et al. [15] e os analíticos de Remennikov et al. [9]. Isto permite uma análise importante da versatilidade da ferramenta numérica em realizar uma simulação de um evento real de elevada complexidade.

2. Fundamentos das explosões por contato

Assim como a massa do explosivo, a distância até o alvo, constitui um parâmetro importante na análise do evento e na predição dos danos a serem causados. Diferente de uma explosão a média ou longa distância, em que as pressões da onda de choque tendem a englobar o alvo por inteiro e carregá-lo mais uniformemente, as

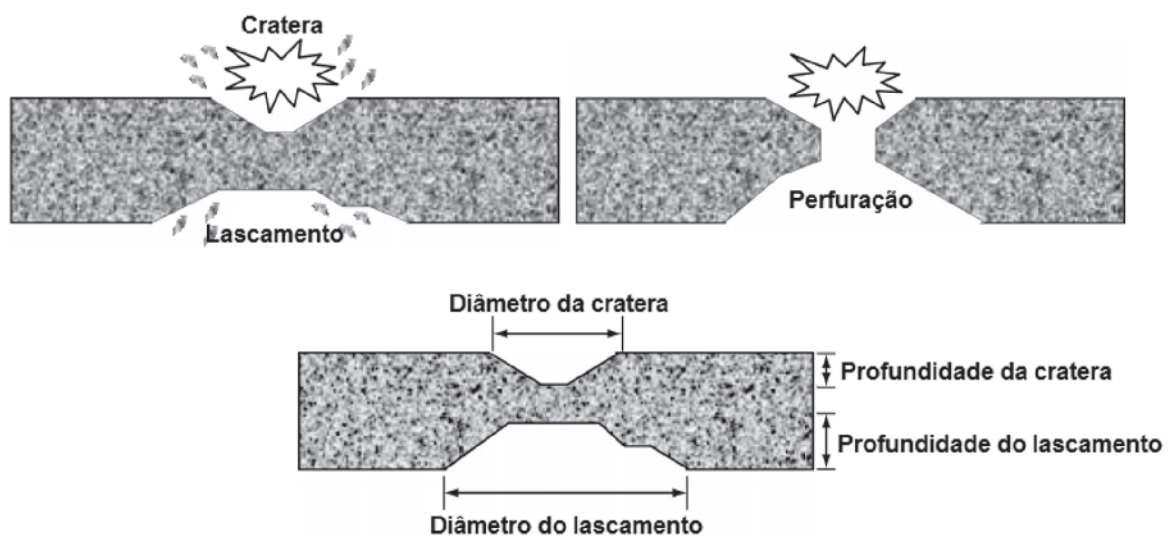


Figura 1

Padrão de dano e dimensões importantes para explosões por contato, Beppu et al. [15]

explosões muito próximas ou em contato são caracterizadas por produzirem dano mais localizado.

O elevado nível de tensão transmitido ao elemento em contato com o explosivo resulta em efeitos localizados de esmagamento e fragmentação. Este conjunto de efeitos relacionados com a capacidade destrutiva do explosivo aplicado pode ser sintetizado pela terminologia potência do explosivo (brisance) [16].

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 danificado irá falhar devido às tensões de tração e seus fragmentos serão projetados da parte de trás da parede [17]. O esquema do padrão de dano esperado por uma explosão por contato em um elemento de concreto pode ser observado na Figura 1.

3. Modelo experimental

Os modelos numéricos foram baseados no experimento desenvolvido por Beppu et al. [15] em que uma placa de concreto simples com 500 mm de lado e 80 mm de espessura foi submetida à detonação de 46 g de C4 posicionado no centro da placa. O concreto possui resistência a compressão de 28,9 MPa.

O autores informaram que o explosivo utilizado nos experimentos possui um formato cilíndrico, sendo o diâmetro deste aproximadamente igual a espessura.

Entretanto, não foi fornecida a densidade exata do explosivo utilizado no experimento, desta forma, para o cálculo das dimensões do cilindro de C4, foi considerada uma densidade de aproximadamente 1,6 g/cm³ [18], um valor similar ao apresentado por Dobratz [19] e comumente considerado em catálogos de explosivos de demolição.

Neste trabalho, foram avaliados os aspectos de dano por crateramento (região em contato com o explosivo) e lascamento (região posterior da parede).

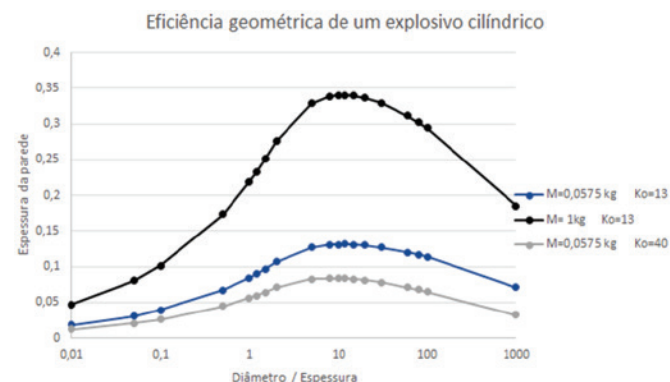


Figura 2
Eficiência geométrica de explosivos cilíndricos com base na proposta de Remennikov et al. [9]

4. Análise teórica

Considerando a hipótese da detonação instantânea e que a detonação de um explosivo em contato com a superfície de um sólido irá produzir um carregamento impulsivo sobre este, Remennikov et al. [9] propuseram a formulação apresentada na Eq. 1.

$$C = \frac{K_0 n^2 h^3}{\mu} \tag{1}$$

onde C é a massa de explosivo em kg de TNT, h é a espessura da placa ou parede, μ é um fator de forma relacionado com a geometria do explosivo (cilíndrico ou prismático), n é o coeficiente de lascamento definido pela Eq. 2 e K_0 relaciona as propriedades do explosivo e do alvo, sendo definido como a massa específica de explosivo necessária para a destruição de 1 m³ de material.

$$n = \frac{X}{h} + \tan \alpha \tag{2}$$

De acordo com Remennikov et al. [9], na Eq. 2, aplicável para explosivos cilíndricos, é possível considerar α igual a 45° e X, que é o raio mínimo da área de aplicação de impulso, seguindo a Eq. 3.

$$\begin{cases} X = \frac{b-H}{2}, & \text{para } \frac{b}{H} \geq 2 \\ X = \frac{b}{4}, & \text{para } \frac{b}{H} \leq 2 \end{cases} \tag{3}$$

Onde b e H correspondem ao diâmetro e a espessura do explosivo, respectivamente.

A partir disso, rearranjando os termos da equação proposta por Remennikov et al. [9], é possível definir um polinômio de terceiro grau em função de h, conforme a Eq. 4. É importante ressaltar que esta expressão é aplicável apenas para explosivos cilíndricos.

$$h^3 + (b-H).h^2 + \left(\frac{b-H}{2}\right)^2 .h - \frac{C}{K_0} \left(1 - 2\frac{H}{b} + \frac{4H^2}{3b^2}\right) = 0 \tag{4}$$

Na equação anterior, fixando a massa de explosivo C e alterando as relações de b e H é possível se encontrar diferentes valores para h, deste modo, buscou-se encontrar uma relação otimizada das dimensões do explosivo de modo que se maximizasse o valor de h (espessura da parede a ser perfurada).

A Figura 2 mostra a representação gráfica da Eq. 4 para diferentes relações geométricas, o eixo horizontal está em escala logarítmica. Para plotagem, primeiro, considerou-se uma massa de explosivo de 0,0575 kg e variou-se o K_0 entre 13 e 40 (concreto simples e concreto reforçado), depois variou-se a massa de explosivo para 1 kg (valor em massa muito superior à considerada anteriormente) com um K_0 com valor de 13.

É possível observar nos gráficos uma região em que a relação entre o diâmetro e a espessura do explosivo é otimizada para perfuração placas de concreto mais espessas, apesar de mantida a mesma massa de explosivo. Desse modo, razões entre o diâmetro (b) e a espessura (H) de valores entre 9 e 12 apresentam-se como otimizadas, quanto ao parâmetro perfuração.

A terminologia *região de geometria otimizada para perfuração* será utilizada neste trabalho para se referir às relações entre diâmetro e espessura de explosivo que apresentam melhor desempenho para perfuração de placas segundo o gráfico anterior.

Manuais de demolição [20] sugerem a utilização de cargas de explosivo em que as dimensões da seção transversal deste sejam superior-

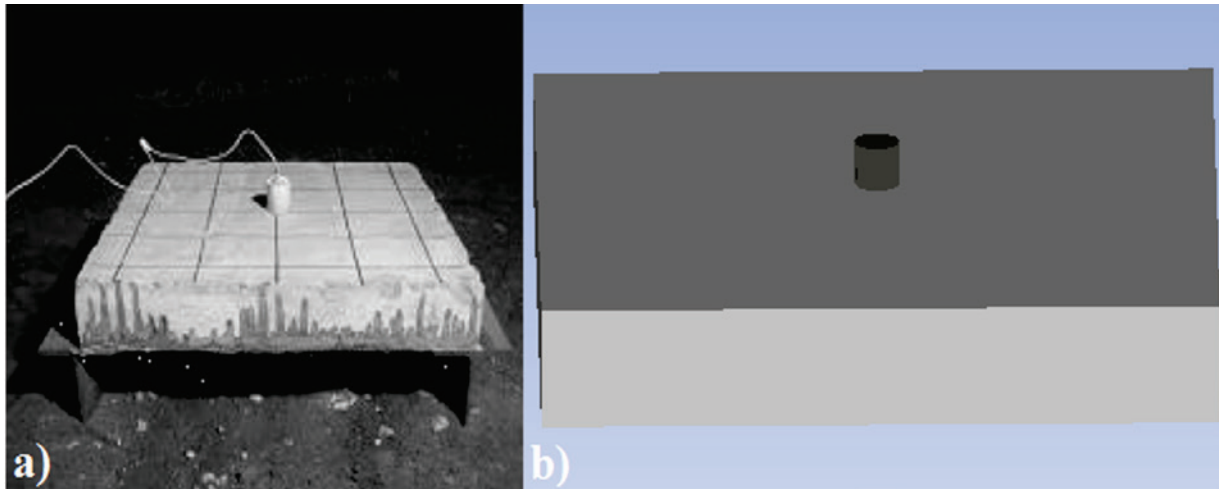


Figura 3

a) experimento desenvolvido por Beppu et al. [15], b) modelo numérico desenvolvido no Autodyn [18]

res à espessura, isto indica que as observações realizadas a partir do gráfico têm aplicabilidade. O quão eficiente é o rearranjo da geometria do explosivo para um melhor aproveitamento energético da explosão na perfuração da parede será avaliado numericamente neste trabalho.

5. Modelagem numérica

As simulações numéricas desenvolvidas neste trabalho foram modeladas no software Ansys Autodyn [18]. Neste software de análise explícita é possível o desenvolvimento de problemas dinâmicos não-lineares envolvendo impactos, penetração e explosão.

Nos hidrocódigos, como o Autodyn [18], a dinâmica do contínuo é descrita a partir de um conjunto de equações diferenciais baseadas nos princípios de conservação de massa, movimento e energia que são solucionadas simultaneamente em cada passo de tempo (timestep) [21]. Nesse contexto, na discretização do problema 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 [22]. No programa, um conjunto de processadores numéricos que podem ser aplicados para modelar diferentes regiões de um mesmo problema está disponível [23].

Esses processadores possuem diferenças entre si, de modo que nenhum deles, isoladamente, pode lidar com toda a complexidade de um evento envolvendo a interação de uma explosão com uma estrutura de forma eficiente. Desse modo, para que a modelagem se dê de forma ideal cabe ao usuário a aplicação adequada desses processadores.

Nos modelos foram utilizados elementos de volume, sendo empregados dois diferentes processadores que contemplaram as zonas de sólido e fluido. O processador lagrangiano foi utilizado nos cálculos dos sólidos (concreto) e o euleriano nos fluidos (ar e processo de combustão do explosivo). Foi habilitada a interação entre estes dois tipos distintos de discretização, permitindo desta forma a simulação adequada da interação entre os produtos de detonação e a placa de concreto.

As simulações realizadas neste trabalho foram modeladas em um

computador com processador I5-7400 3 GHz e 16 GB de RAM e o tempo médio para simulação de 2 ms de cada modelo com malha de refinamento 1 mm foi de, aproximadamente, 3 semanas.

5.1 Modelos numéricos

Os modelos desenvolvidos neste trabalho consistem na modelagem de uma placa de concreto simples submetida à detonação de um dispositivo cilíndrico de C4 sobre sua superfície. A placa de concreto é apoiada em suas extremidades conforme o experimento tomado como base [15].

Ao todo foram realizadas cinco simulações, a primeira e segunda simulações similares ao experimento de Beppu et al. [15]. Estas foram modeladas para verificar a influência do refinamento da malha na precisão dos resultados, padrão de dano e na reprodutibilidade computacional do experimento, sendo utilizadas malhas de 5 mm e 1 mm, respectivamente.

A Figura 3 ilustra o modelo experimental ao lado do modelo numérico desenvolvido. É importante lembrar que nesses casos foi considerado um explosivo cilíndrico com 34 mm de diâmetro e 33 mm de espessura, sendo a espessura da placa de concreto de 80 mm. Na terceira simulação foi avaliada a proposta de otimização geométrica da massa de explosivo. A modelagem foi realizada utilizando um refinamento de malha de 1 mm, de modo a situar-se na região ótima para perfuração, o explosivo a base de C4 foi modelado com 74 mm de diâmetro e 7 mm de espessura. Neste modelo, a placa de concreto utilizada é a mesma das simulações anteriores e idêntica à do experimento.

Tabela 1
Propriedades do ar

	Ar
γ	1,40
Densidade de referência	0,001225 g/cm ³
Temperatura de referência	288,2 K
Calor específico	717,599976 J/kgK

Tabela 2
Propriedades do C4

C4	
Densidade de referência	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 _∞	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

Na quarta simulação foi desenvolvida uma placa de concreto idêntica à utilizada nos modelos anteriores, entretanto, o explosivo aplicado possui a relação entre o diâmetro e a espessura completamente fora de região otimizada, tendo 15,8 mm de diâmetro e 155 mm de espessura.

Na quinta e última simulação foi considerada uma placa de concreto similar aos modelos anteriores, exceto pela espessura que é de 122 mm (53% mais espessa que a placa empregada nos casos anteriores), esta placa foi submetida a detonação do mesmo explosivo com geometria otimizada utilizada no terceiro modelo.

A espessura da placa de concreto desenvolvida na quinta simulação foi estimada a partir da proposta de Remennikov et al. [9].

5.2 Modelos constitutivos

Para a elaboração dos modelos foi necessária a utilização de materiais como o concreto, o C4 e o ar. A tecnologia da fluidodinâmica computacional demanda uma equação de estado para definição dos materiais, em adição aos modelos constitutivos.

A equação de estado de gás ideal foi utilizada para o ar, Eq. 5.

$$P = (\gamma - 1)\rho e \tag{5}$$

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. As propriedades do ar são apresentadas na Tabela 1.

Para descrever o processo de combustão e expansão dos produtos de detonação do C4, foi utilizada a equação de estado JWL, Eq. 6. As propriedades do C4 são apresentadas na Tabela 2.

$$P_h = C_1 \cdot \left(1 - \frac{\omega_{co}}{R_1 V_e}\right) e^{-R_1 V_e} + C_2 \cdot \left(1 - \frac{\omega_{co}}{R_2 V_e}\right) e^{-R_2 V_e} + \frac{\omega_{co} E_i}{V_e} \tag{6}$$

Tabela 3
Propriedades do concreto

Concreto	
Densidade de referência	2,50 g/cm ³
Resistência à compressão	28,9 MPa
Calor específico	654 J/kgK

Tabela 4
Comparação entre os modelos experimental, o numérico e o teórico

Modelo	Diâmetro da cratera (mm)	Diâmetro do lascamento (mm)	Profundidade da cratera (mm)
Beppu et al. [15]	130-160	210	20-28
1° Simulation (5 mm)	100	180	20
2° Simulation (1 mm)	106	200	20
Remennikov et al. [9]	204	195	21

Em que, P_n é a pressão hidrostática, C₁, C₂, R₁, R₂ e ω_∞ 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 [24], 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 [25].

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 [26]. Esta equação de estado para materiais totalmente compactados para p ≥ 0 e p < 0 é apresentada nas formulações mostradas nas Eq. 7 e Eq. 8, respectivamente. A Eq. 9 apresenta esta equação de estado considerando um material poroso (p ≥ 0):

$$p = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e \tag{7}$$

$$p = T_1 \mu + T_2 \mu^2 + B_0 \rho_0 e \tag{8}$$

$$p = A_1 \bar{\mu} + A_2 \bar{\mu}^2 + A_3 \bar{\mu}^3 + (B_0 + B_1 \bar{\mu}) \rho_0 e \tag{9}$$

Em que, p é a pressão, ρ₀ 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 Tabela 3 apresenta as propriedades empregadas para o concreto.

Para uma modelagem adequada de sólidos submetidos a carregamentos de alta intensidade como os advindos de uma explosão por contato, é necessária a utilização de modelos de erosão de modo regular as grandes distorções apresentadas pela malha Lagrangeana [27] (zona discretizada do sólido calculada pelo processador de Lagrange), neste trabalho foi utilizado o modelo de deformação geométrica instantânea efetiva com limite de deformação de 0.5.

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

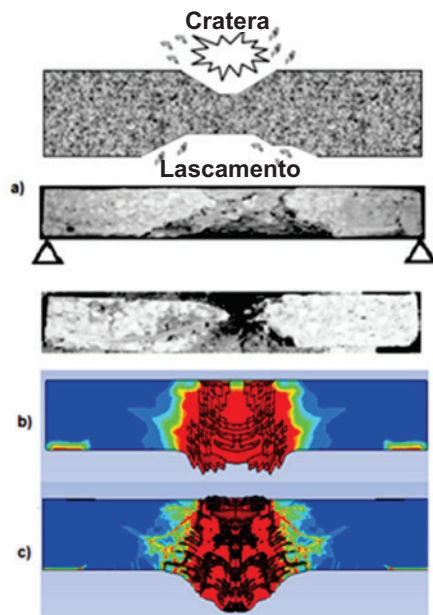


Figura 4

a) Esquema e experimento por Beppu et al. [15],
 b) 1ª simulação em 2 ms (malha de 5 mm)
 e c) 2ª simulação em 2 ms (malha de 1 mm)

6. Resultados e discussão

6.1 Primeira e segunda simulação

As duas primeiras simulações realizadas foram baseadas no trabalho desenvolvido por Beppu et al. [15]. Buscou-se avaliar a reprodutibilidade numérica do experimento e o desempenho dos refinamentos de malha de 5 mm e de 1 mm.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos numericamente em comparação com os obtidos por Beppu et al. [15] e os estimados através da formulação de Remennikov et al. [9].

Os resultados numéricos obtidos para a profundidade da cratera apresentam uma considerável precisão com os experimentais e uma boa representatividade, o mesmo pode ser observado para os diâmetros obtidos da região de crateramento (formada a partir

Tabela 5

Resultados da proposta de geometria otimizada do explosivo

Modelo	Diâmetro da cratera (mm)	Diâmetro do lascamento (mm)	Profundidade da cratera (mm)
Beppu et al. [15]	130-160	210	20-28
2ª Simulação (1 mm)	106	200	20
3ª Simulação (1 mm)	166	236	35
4ª Simulação (1 mm)	50	-	8

da superfície de contato da placa com o explosivo) e região de lascamento (na parte posterior da placa de concreto), como pode ser visto na Figura 3. Nesta figura, é utilizada uma escala de dano (damage), em que 0 (cor azul) representa o material íntegro e 1 a falha completa (cor vermelha).

Ainda na Figura 4, é possível se comparar o padrão de dano apresentado pela simulação numérica com o apresentado pelo experimento, sendo possível observar muitas similaridades.

Com relação ao desempenho das malhas do modelo numérico é possível afirmar que um maior refinamento resultou numa definição mais precisa da região do dano.

As pequenas diferenças entre os resultados experimentais e os numéricos talvez estejam relacionadas às condições do concreto in loco ou com algumas especificações dos modelos, por exemplo, um refinamento maior, provavelmente, traria resultados mais precisos. Os 2 ms simulados para cada modelo foram suficientes para determinação das grandezas apresentadas, neste tempo de simulação

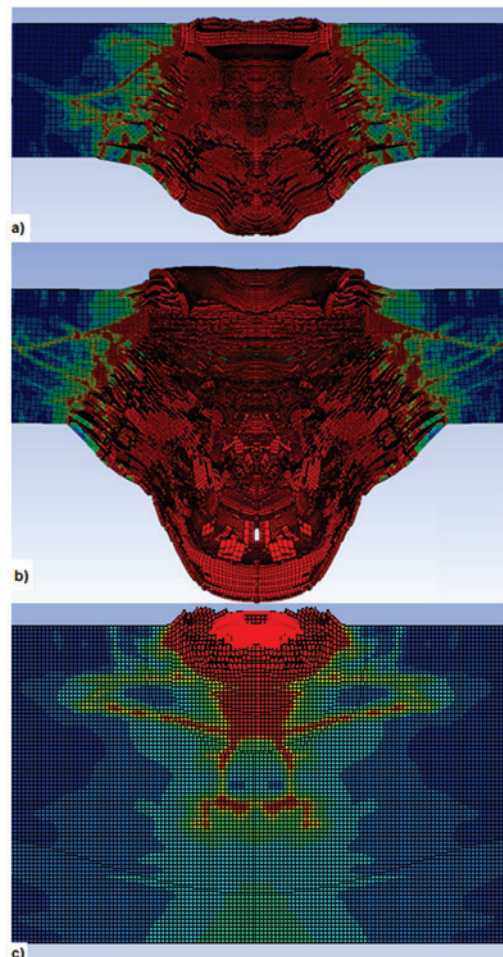


Figura 5

a) 2ª Simulação em que foi utilizado um explosivo idêntico ao do experimento b) 3ª simulação em que foi empregado um explosivo com geometria otimizada) e c) 4ª simulação em que foi utilizado um explosivo com geometria inadequada

Tabela 6

Resultados da proposta de geometria otimizada do explosivo

Modelo	Diâmetro da cratera (mm)	Diâmetro do lascamento (mm)	Profundidade da cratera (mm)
5° Simulação (1 mm)	160	300	34

não se observava mais acréscimos ao dano causado e a energia cinética dos elementos já estava muito reduzida. Entretanto, para definição das dimensões exatas e finais do furo produzido seria necessário mais tempo de simulação, o que pode ser dispendioso em softwares de análise explícita.

6.2 Terceira e quarta simulação

Nestas simulações foi avaliado o desempenho da proposta de otimização geométrica do explosivo tendo como parâmetro para comparação o modelo experimental base. Nessas simulações o terceiro e quarto modelos apresentam um explosivo com geometria “otimizada” e um explosivo com geometria fora da relação ótima, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os resultados encontrados para esses modelos em comparação com o modelo experimental adotado como base.

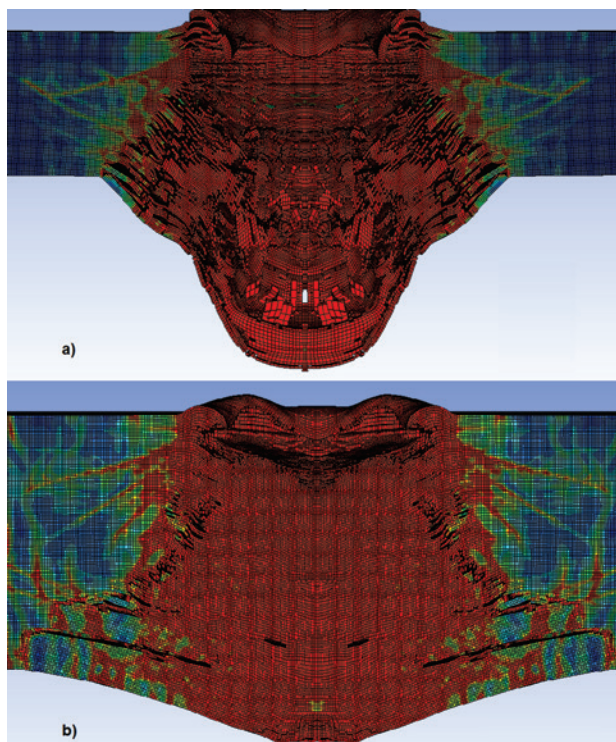


Figura 6
Nível de dano provocado numa placa de concreto pela detonação do explosivo com geometria otimizada, 3° simulação (a); 5° simulação (b)

Os resultados mostraram a influência da geometria do explosivo no nível de dano provocado na placa de concreto, verificou-se que o rearranjo das dimensões do explosivo foi suficiente para incrementar de forma relevante seu poder destrutivo. Em termos de perfuração, o desempenho do explosivo com geometria otimizada foi superior à situação padrão. Entretanto, são necessários experimentos e mais simulações para se constatar a aplicabilidade da proposta, a princípio, ela demonstrou-se eficiente no aproveitamento da energia do explosivo canalizando-a para perfuração da placa.

O quarto modelo 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.

Na Figura 5 é possível observar uma comparação entre o nível de dano dos modelos em 2 ms de simulação, nas figuras é utilizada a mesma escala de dano da Figura 4. É importante salientar que a massa de explosivo em todos os modelos é a mesma e, que apesar de todos os explosivos utilizados serem cilíndricos, aplicou-se o conceito de geometria otimizada no explosivo da 3° simulação.

6.3 Quinta simulação

Nesta simulação foi utilizado o explosivo com geometria “otimizada” empregado na terceira simulação, mas a espessura da placa de concreto simulada foi 122 mm (53% mais espessa que nos casos anteriores).

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos.

Foi observado que a utilização de um explosivo com geometria otimizada resultou em uma perfuração expressiva da parede de 80 mm e que o mesmo explosivo foi capaz de danificar severamente uma placa de concreto bem mais espessa (122 mm), nela é possível identificar claramente a região de crateramento e de lascamento como mostra a Figura 6. Nesta figura, é mostrado também os resultados da 3° simulação de modo permitir uma visualização do desempenho do mesmo explosivo na perfuração de placas com diferentes espessuras.

Essa simulação demonstrou que não apenas a massa de explosivo é definitiva na predição do furo em um elemento de concreto, já que uma massa de explosivo inferior a necessária para perfuração conseguiu causar danos críticos na placa apenas por possuir uma geometria adequada para perfuração. Entretanto, fica claro que seria necessária uma maior massa de explosivo para uma perfuração mais efetiva desta placa de concreto mais espessa, o que aponta para o limiar do potencial destrutivo da massa de explosivo utilizada.

7. Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidos modelos numéricos em que se estudou a perfuração de placas de concreto por uma carga de explosivo em sua superfície.

As duas primeiras simulações desenvolvidas foram baseadas no trabalho de Beppu et al. [15] e os resultados apresentados por elas estão bem próximos dos encontrados experimentalmente. Comparando as diferentes malhas, observou-se que a malha com refinamento de 1 mm apresentou os melhores resultados, com uma definição mais precisa da região de dano. Devido a boa precisão apresentada, apesar do elevado custo computacional, este

tipo de refinamento de malha, aparentemente, pode ser indicado para estudos deste tipo.

Na terceira e quarta simulação foi analisada a proposta para otimização da geometria do explosivo, nela foi mantida a massa de C4 das simulações anteriores, mas se alterou as relações entre as dimensões do explosivo.

Verificou-se na terceira simulação, em que a razão entre o diâmetro e a espessura do explosivo estava na região de geometria otimizada para perfuração, que o dano produzido na placa de concreto foi bastante superior a situação padrão simulada, que foi baseada no experimento de Beppu et al. [15], em que a razão entre dimensões diâmetro e a espessura do explosivo eram iguais a 1. Isto indica que em um explosivo com geometria adequada há um melhor aproveitamento da energia de detonação e uma canalização da energia produzida, sendo esta, direcionada para perfuração da placa.

Na quarta simulação, em que se utilizou um explosivo com dimensões muito fora da região de geometria otimizada, observou-se uma perda significativa da energia da explosão para o meio, desse modo, apenas uma parte da energia da detonação do explosivo atingiu a placa não conseguindo perfurá-la. É importante salientar que a massa de explosivo foi a mesma utilizada nos modelos anteriores e que o explosivo também estava em contato com a superfície da placa, com isso se pode concluir que, além da massa de explosivo, a disposição deste sobre a placa é de fundamental importância para definição da extensão do dano.

Por conta disso, conclui-se que não é possível se fazer uma predição adequada do dano de uma explosão conhecendo-se apenas a massa de explosivo e a distância até o alvo, a geometria do explosivo mostrou ter influência significativa no aproveitamento energético da explosão e, portanto, deve ser considerada ao se realizar estudos de predição de dano, principalmente em curtas distâncias.

Na quinta simulação, foi aplicado o mesmo explosivo da terceira simulação, entretanto a placa de concreto a ser perfurada era cerca de 53% maior. Constatou-se que apesar da placa ser bem mais espessa, o explosivo com geometria otimizada conseguiu causar danos significativos na placa sendo possível identificar as zonas de crateramento e lascamento.

Apesar disso seria necessário um tempo de simulação demasiadamente longo para se captar com clareza a região do furo dada a espessura do sólido. É estimado que, considerando o mesmo hardware utilizado, seria necessário um tempo de simulação em torno de dois meses para se obter a definição completa do furo neste caso. É importante observar que mesmo a carga de explosivo sendo inferior à necessária para a perfuração adequada desta placa espessa, ela foi suficiente para causar danos significativos. Isto indica que o projeto adequado da geometria do explosivo pode garantir um melhor aproveitamento energético deste, ao passo que o desenvolvimento de placas de concreto resistentes a explosões deve também contemplar, além da massa, a geometria do explosivo e a disposição dele ao longo da superfície da placa.

8. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio fornecido à pesquisa realizada.

9. Referências bibliográficas

- [1] Akers, S. A., Weed, R., Rickman, D. D., Danielson, K. Numerical Simulations of Explosive Wall Breaching, Proceedings of the Users Group Conference, Computer Society, 2005, Denver, USA.
- [2] Akers, S. A., Rickman, D. D., Ehrgott, J. Numerical Simulations of Blast Pressures During Wall Breaching, Proceedings of the Users Group Conference, Computer Society, 2006, Denver, USA.
- [3] Wu, K. C., Li, B., T, K. C. The effects of explosive mass ratio on residual compressive capacity of contact blast damaged composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, 2011, pg 602-612.
- [4] Li, B., Nair, A., Kai, Q. Residual Axial Capacity of Reinforced Concrete Columns with Simulated Blast Damage. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, vol. 26, 2012, 287-299.
- [5] Y. Shi, W. Xiong, Z.-X. Li, Q. Xu. Experimental studies on the local damage and fragments of unreinforced masonry walls under close-in explosions. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 90, 2016, 122–131.
- [6] F. R. Zhang, C. Q. Wu, H. W. Wang, Y. Zhou. Numerical simulation of concrete filled steel tube columns against BLAST loads. *Thin-Walled Structures*, vol. 92, 2015, 82–92.
- [7] Codina, R. H, Ambrosini, D. Borbón, F. M.. Columnas sometidas a explosiones de campo cercano. XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 2016, Paraguai.
- [8] Esteban, B., Gebbeken, N. A comparison of numerical modelling strategies in contact detonation scenarios with concrete targets. *Int. J. of Comput. Methods Exp. Meas.*, vol. 4, nr. 3, 2016, pg 231–246.
- [9] Remennikov, A. M., Mentus, I., Uy, B. Explosive breaching of walls with contact charges: theory and applications, *Int. J. of Protective Structures*, vol. 6, no. 4, 2015, pg 629–647.
- [10] Yue, S., Qiu, Y, Zhang, N., Wang, M. Analytical study of local damage on concrete slab subjected to a contact explosion, *Journal of Vibroengineering*, vol. 19, nr. 2, 2017, pg 908-929.
- [11] Quan X, Birnbaum N. Computer simulation of impact and collapse of New York World Trade Center north tower on September 11. In: Proceedings of the 20th international symposium on ballistics, 2002, Orlando.
- [12] Kim, H., Ahn, J. and Ahn, H. Computational simulation of progressive collapse of reinforced concrete rigid frame with reinforcement contact model. *Advances in Structural Engineering*, vol. 19, nr. 6, 2016, pg 982-994.
- [13] Li, J., Wu, C., Hao, H. and Su, Y. Experimental and numerical study on steel wire mesh reinforced concrete slab under contact explosion. *Materials & Design*, vol. 116, 2017, pg 77-91.
- [14] Remennikov, A. M., Uy, B. Explosive testing and modelling of square tubular steel columns for near-field detonations, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 101, 2014, pg 290–303.
- [15] Beppu, M., Ohno, T., Ohkubo, K., Li, B. and Satoh, K. Contact Explosion Resistance of Concrete Plates Externally Strengthened with FRP Laminates. *International Journal of Protective Structures*, vol. 1, nr. 2, 2010, pg.257-270.

- [16] Mays, G. C., Smith, P. D. Blast effects on buildings, Thomas Telford, 1995, Londres.
- [17] Millard, S. G., Molyneaux, T. C. K., Barnett, S. J., Gao, X. Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading, *Int. J. of Impact Eng.*, vol. 37, nr. 4, 2010, pg 405–413.
- [18] ANSYS Autodyn Interactive Non-Linear Dynamic Analysis software version 15. User's Manual, SAS IP Inc, 2014, USA.
- [19] Dobratz, B. M. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, Universidade da Califórnia, UCRL-51319, Laboratório Lawrence Livermore, 1972, EUA .
- [20] FM 3-34.214. Explosives and demolitions, Department of the Army, 2007, USA.
- [21] Gebbeken, N., Ruppert, M. A new material model for concrete in high-dynamic hydrocode simulations, *Arch. Appl. Mech.*, vol. 70, nr. 7, 2000, pg 463–478.
- [22] Anderson Jr., J. D. Computational Fluid Dynamics. McGraw-Hill series, 1995, USA.
- [23] Birnbaum, N. K., Clegg, R. A., Fairlie, G. E. Analysis of Blast Loads on Buildings, Century Dynamics Incorporated, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Structures Under Extreme Loading Conditions, 1996, USA.
- [24] Herrmann, W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials, *J. Appl. Phys.*, vol. 40, nr. 6, 1969, pg 2490–2499.
- [25] Hartmann, T., Pietzsch, A., Gebbeken, N. A Hydrocode Material Model for Concrete, *International Journal of Protective Structures*, vol. 1, nr 4, 2010, pg 443-468.
- [26] Luccioni, B. M., Araoz, G. F., Labanda, N. A. Defining Erosion Limit for Concrete, *Int. J. of Protective Structures*, vol. 4, nr. 3, 2013, p. 315–340.
- [27] Luccioni, B. M., Aráoz, G. Erosion Criteria for Frictional Materials Under Blast Load, *Mecánica Computacional*, vol. 30, 2011, p. 1809–1831.