

Modelação Numérica do Comportamento de um Sistema Inovador de Proteção de Edifícios face a Explosões

Luís Pires; Gabriel Gomes
CCPI, CINAMIL, Academia Militar
Academia Militar
Lisboa, Portugal

pires.lmm@exercito.pt; gomes.gj@exercito.pt

Eduardo Júlio
CERIS, DECivil, IST-UL
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal

eduardo.julio@tecnico.ulisboa.pt

Resumo — A vida humana, ocasionalmente é ameaçada. O estudo de um sistema de proteção para infraestruturas contra explosões pode ajudar a mitigar algumas dessas ameaças.

No âmbito da tese de doutoramento do TCor. Gabriel Gomes, desenvolveu-se um sistema de proteção inovador. Foi testado com sucesso e as suas capacidades foram comprovadas. O presente trabalho pretende contribuir através do desenvolvimento de uma análise numérica avançada desta solução. Nesta fase, o sistema físico é idealizado num modelo 3D através do SolidWorks. Depois, o modelo é dividido em elementos recorrendo ao HyperMesh. Após a definição de parâmetros do problema através do LS-Prepost, o produto é processado pelo solver LS-DYNA, e os resultados são revistos. Além disso, são utilizados três métodos para aumentar a sua confiança, eficiência e precisão. Pretende-se simular e compreender o comportamento do sistema, assim como explorar ideias e soluções adicionais.

Resultados revelam que a capacidade do sistema é elevada, reduzindo significativamente os efeitos da explosão. Mesmo com imperfeições que conduzem a excentricidades, o sistema não perde o seu desempenho, muito pelo contrário. Nos casos mais graves, podem ocorrer fenómenos de encurvadura. No entanto, o sistema apresenta sempre deformação por inversão, sustentando a eficácia deste sistema de absorção.

Palavras-chave — Explosão; tubo invertido; absorção de energia; LS-DYNA; análise numérica.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos explosivos, devido às suas características intrínsecas, foi iluminado pela intersecção entre a necessidade militar e a adaptação tecnológica face aos constrangimentos económicos [1]. Esta é a dualidade dos explosivos. São capazes de muitos benefícios, mas também podem ser caóticos e mortais. Muitos destes acontecimentos estão associados ao terrorismo, cujo verdadeiro custo vai muito para além das baixas e das perdas financeiras. Os meios de comunicação social podem ainda jogar indiretamente nas mãos das organizações terroristas e ajudá-las na sua campanha de recrutamento [2]. A Europa parece ganhar um interesse crescente na utilização de explosivos, especialmente dispositivos explosivos improvisados (IED). Alguns são muito fáceis de fabricar, continuando a ser os preferidos, os explosivos caseiros, cujos conhecimentos podem ser facilitados online.

Tendo em conta o risco crescente de tais eventos em todo o mundo, é imperativo tratar desta questão [3, 4].

Foram estudados vários problemas de engenharia de impacto durante as últimas décadas, especialmente no campo da resposta dinâmica de estruturas no regime plástico. O projeto de investigação PROTEDES (Proteção de Edifícios Estratégicos contra Explosões), onde se inclui a tese de doutoramento do TCor. Gabriel Gomes, pretende empregar tubos. No entanto, recorre a uma das variações mais interessantes desta estrutura, os tubos invertidos. Uma grande limitação desta é a falta de informação fiável sobre o seu modo de deformação relativamente ao comportamento dinâmico, principalmente porque a maioria dos estudos existentes foram realizados em condições quase-estáticas.

O presente trabalho visa contribuir para aprofundar o conhecimento dos fenómenos, com os seguintes objetivos principais: i) apresentar a atividade experimental; ii) construir um modelo 3D altamente detalhado, tanto do dispositivo de absorção de energia como de todo o sistema de proteção; iii) efetuar uma análise numérica com um foco na simulação do verdadeiro comportamento dinâmico com base nos dados experimentais fornecidos pela tese de doutoramento do Gomes; iv) contribuir para o desenvolvimento do conhecimento nesta área.

II. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

As consequências imprevisíveis e destrutivas provocadas pelas explosões podem surgir de acidentes até ações deliberadas cometidas pela humanidade. Por conseguinte, foi estabelecida uma preocupação e necessidade em considerar o comportamento das estruturas de engenharia sob a ação de explosões.

As categorias de explosões podem ser: físicas, nucleares, ou eventos químicos [5, 6, 7, 8]. Os eventos químicos são os mais comuns, sendo por isso a análise será centrada neles. As explosões podem ser classificadas como explosões confinadas (ou interiores), explosões não confinadas (ou exteriores) ou explosões acopladas à estrutura. Inseridas nas explosões não confinadas, podem ainda ser subdivididas em três tipos de explosões: explosão aérea perfeita; explosão próxima do solo e explosão em contacto com o solo [9, 10]. As explosões não confinadas, externas a uma estrutura e em contacto com o solo, serão as consideradas. As explosões em contacto com o solo,

foram adotadas no contexto da campanha experimental, as mais comuns em atentados terroristas [11].

A. Reflexão das Ondas de Choque

Quando uma onda de choque intersecta uma superfície sólida, como ilustrado na Fig.1, fica sujeita ao fenómeno de amplificação e reflexão, sendo a pressão refletida de pico (P_r) sempre superior à pressão incidente (P_{so}) que a originou.

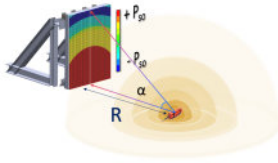


Figura 1- Representação do sistema de proteção simulado. Ilustra dois aspetos importantes: i) a influência do ângulo de impacto na magnitude da pressão refletida, e ii) o facto de a onda de choque se propagar de forma esférica.

O valor de pressão refletida da superfície torna-se máximo no ponto de distância normal (R) entre a fonte de detonação e a superfície. O valor da pressão refletida diminui à medida que o α (ângulo de incidência) aumenta, e pode ser determinado por vários métodos. Os mais comuns são o de Rankine e Hugoniot [5, 12]. Considerando P_o a pressão ambiente, a Eq. 1 pode ser derivada:

$$P_r [kPa] = 2P_{so} \cdot \left(\frac{7P_o + 4P_{so}}{7P_o + P_{so}} \right) \quad (1)$$

B. Caracterização das Ondas de Choque

Durante os finais dos anos 1950-1980, os seus parâmetros foram amplamente investigados em vários estudos [10, 13, 14, 9]. Todos esses parâmetros são representados graficamente em UFC 3-340-02 [9], utilizando os dados de teste recolhidos por Kingery e Bulmash [14]. Os parâmetros mais relevantes são: P_{so} pressão incidente de pico; t_o^+ duração da fase positiva; i_s^+ impulso positivo; t_a tempo de chegada da frente de explosão; P_r pressão reflectida de pico; i_r impulso reflectido. O perfil idealizado da pressão em relação ao tempo para o caso de uma onda de explosão aérea perfeita, medida num elemento a uma certa distância, representado na Fig. 2, é descrito a partir do momento da detonação.

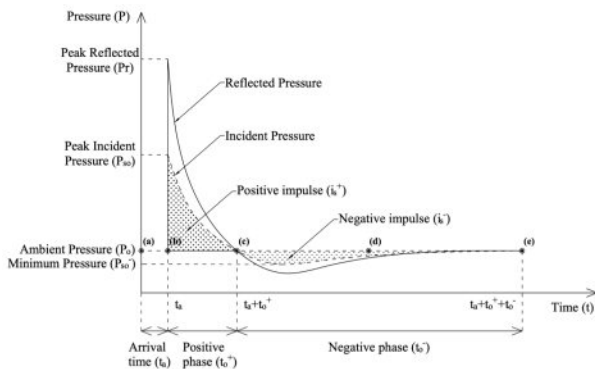


Figura 2 - Perfil idealizado para a variação de pressão.

A queda de pressão ao longo do tempo, pode ser representada pela equação modificada de Friedlander (Eq. 2) [10, 9]:

$$P_s(t) = P_{so} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_o} \right) \cdot e^{-\beta \frac{t}{t_o}} \quad (2)$$

onde P_{so} [kPa] corresponde à pressão incidente de pico, t_o [ms] à duração da fase positiva, t [ms] ao período de tempo entre o instante de chegada (t_a) e aquele em que esta a ser realizada a análise, e β é o coeficiente de decaimento da curva [5].

III. SOLUÇÃO PROTECTORA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A. Introdução

Este trabalho faz parte de dois projetos complementares, em curso, que estão a tentar desenvolver soluções de alta proteção contra explosões, nomeadamente BLADE¹ e PROTEDES². O sistema de proteção desenvolvido e testado experimentalmente baseia-se num painel rígido (betão reforçado) ao qual está ligada uma pluralidade de conetores metálicos dúcteis, concebidos para explorar um mecanismo de inversão.

O sistema tem três objetivos principais. Em primeiro lugar, os painéis rígidos recebem a explosão diretamente, o que reduz a pressão refletida e o impulso que são diretamente transmitidos à estrutura. Para além disso, protege contra fragmentos projetados, impactos e incêndios. Em segundo lugar, a deformação plástica dos conetores, dissipa a maior parte da energia da explosão, reduzindo a energia transmitida à estrutura. Em terceiro lugar, a localização dos conetores permite simultaneamente redirecionar a energia transferida para as lajes da estrutura, protegendo elementos vulneráveis (por exemplo, pilares).

B. Conetor de absorção de energia

Existem várias estruturas típicas de absorção de energia, sendo os tubos uma delas [15, 16]. Uma estrutura como um tubo, que começa a deformar axialmente pode subitamente curvar-se no modo de flexão global, causando uma quebra significativa na capacidade da estrutura de absorver a energia de impacto [17]. Contudo, esta questão foi encarada utilizando uma das variações mais interessantes desta estrutura, o tubo invertido, que tem o modo de deformação mais eficiente em relação à absorção de energia entre os possíveis. Além disso, permite uma deformação com uma carga de inversão constante. A literatura atual carece de informação fidedigna sobre fontes abertas relativamente ao comportamento dinâmico destes dispositivos de absorção de energia face aos efeitos da ação da explosão.

C. Materiais

Para este estudo, foram produzidos dezasseis painéis de betão armado. As propriedades do material foram determinadas por Gomes [18], através de ensaios de tração em aço e ensaios de compressão uniaxial em cilindros de betão. Cada painel tinha as características apresentadas nas tabelas seguintes, Tab. 1 a 3.

¹ Blast Protective Walls Design Optimization

² Protection of strategic Buildings Against Explosions

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DO PAINEL DE BETÃO ARMADO [18].

Concrete	
Strength Class	C25/30
$f_{cm}[MPa]$	33
$f_{ctm}[MPa]$	2.6
Slab dimensions [m]	2.75 x 1.00 x 0.21
Concrete cover [m]	0.025

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DOS TUBOS DE AÇO [19].

Specimen [mm]	E[GPa]	$\sigma_{y(0.2\%)}[MPa]$	$\sigma_u[MPa]$	$\epsilon_{max}[\%]$
ϕ 64 x 2	210.6	371	423	16

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DAS ARMADURAS [18].

Specimen [mm]	E[GPa]	$\sigma_{y(0.2\%)}[MPa]$	$\sigma_u[MPa]$	$\epsilon_{max}[\%]$
ϕ 16	200	542	639.3	5

Neste estudo, foram utilizados três diâmetros de tubo (64 mm, 54 mm e 42 mm) para melhor compreender o mecanismo de inversão e verificar a importância da influência dos diferentes parâmetros. Devido a restrições de tempo, o diâmetro de 64 x 2 [mm] foi o diâmetro analisado na presente investigação. Nas Figuras 3 e 4, é possível verificar a aplicação do tubo no conector, bem como a dinâmica do seu mecanismo.



Figura 3: Representação de um corte de secção do Dispositivo de Absorção de Energia (DAE), inserido no sistema de proteção [18].

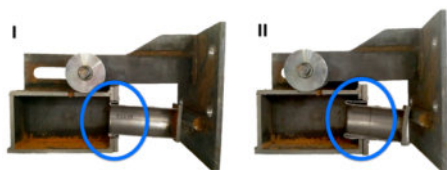


Figura 4: Corte da secção do DAE. I) Antes da explosão. II) Após a explosão. Reproduzido com a autorização de Gomes [18].

D. Componentes

O conector de absorção inclui vários componentes, como mostra a figura 5.

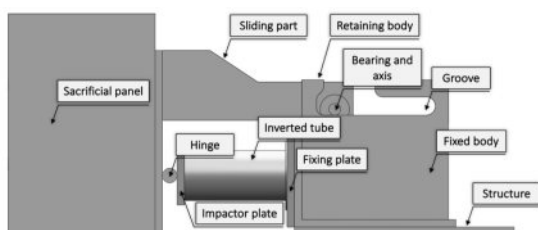


Figura 5: Captura dos diferentes componentes que constituem o Dispositivo de Absorção de Energia (DAE).

E. Explosivo e Configuração Utilizada

O explosivo utilizado na campanha experimental associada é conhecido pelo nome de "Goma-2 ECO", comercialmente vendido como RIODIN pela MAXAM's. O ensaio de explosão foi realizado com uma carga explosiva de 60 kg. A campanha de

ensaio de explosão é disposta radialmente compreendendo quatro sistemas de proteção, permitindo testar em simultâneo, a uma distância, entre os painéis e o explosivo, de 5 m.

F. Resultados

Todos os testes foram monitorizados com manómetros de pressão, permitindo o rastreio da pressão incidente, apresentada em Tab. 4 [18].

TABELA 4: DADOS EXPERIMENTAIS, COM OS PARÂMETROS MÉDIOS AJUSTADOS PARA AMBOS OS SENSORES [18].

Sensor ID	P_{50} [kPa]	t_0 [ms]	i_0 [kPa · ms]	α [-]
Ground	1256	1.9	526.82	3.12
Elevated (2.5 m)	765.7	1.9	410.05	1.34

Foram recolhidos dados adicionais (ângulo de impacto, deformação local, força entre outros), e em termos de deformação, um comprimento médio total de inversão de 87 mm foi considerado mais tarde na análise numérica para a calibração e validação do modelo. As parcelas de força também mostram claramente o efeito da introdução de um DAE, na redução do impulso transmitido à estrutura protegida.

G. Observações

Adicionalmente e de acordo com os resultados obtidos, foram observados aspetos relevantes, nomeadamente: i) uma resposta diferencial nos conectores inferior e superior; ii) num caso, parte da energia foi absorvida pelo mecanismo de flexão e pelo arranque dos parafusos da base de betão; iii) não ocorreu um encurvamento das paredes dos tubos, mesmo quando ocorreu uma rotação significativa, o que representa um desempenho promissor em termos de eficácia e fiabilidade do sistema de proteção; iv) na maioria dos casos, ocorreu um impacto excêntrico, causando uma ligeira rotação do conector.

IV. DESENVOLVIMENTO DE MODELOS NUMÉRICOS

A. Introdução

Em geral, os métodos tradicionais envolvem a idealização de modelos físicos através de equações simples para obter soluções. Alternativamente, os métodos de elementos finitos, e outros métodos numéricos, destinam-se a fornecer uma análise que considera um maior detalhe, levando a resultados mais precisos [20, 21]. O método de elementos finitos é uma técnica avançada utilizada para resolver problemas complexos de análise estrutural. Envolve a discretização de uma geometria em elementos finitos, ligados por nós e recorre a um solver para obter soluções aproximadas [21]. Além disso, as técnicas de análise de elementos finitos não lineares têm sido amplamente utilizadas para analisar elementos estruturais, incluindo lajes de betão armado sob cargas explosivas [22].

B. Metodologia de Análise

O processo começou com a criação das diferentes geometrias de corpos individuais que constituem o sistema. Esta tarefa foi conduzida com o SolidWorks® Versão Académica 2020-2021. Posteriormente, Altair® HyperMesh® Versão 2021 foi empregue como pré-processador para construir a malha do modelo geométrico, dividindo-o em milhares de formas poligonais, cada uma delas representando um elemento. Posteriormente, o LS-Prepost foi também utilizado como um pré-processador para definir os parâmetros do problema. As

análises foram então conduzidas através do solver LS-DYNA, conseguindo a solução aproximada do problema. Na sequência das análises, os resultados foram novamente importados para o LS-Prepost. Nesta etapa, este último foi utilizado como pós-processador para converter o produto em formato legível ou visual. O Autodesk AutoCAD®2018.2 Versão O.48.M.563 foi também utilizado como ferramenta secundária, para desenvolver parte do método do Segmento de Carga (LSS), ler os desenhos do sistema de proteção e criar figuras. A metodologia aplicada é representada na Fig. 6. Para completar a análise, foi posteriormente realizado um conjunto de estudos para produzir uma análise numérica mais fidedigna. Adicionalmente, são apresentados resultados, problemas e recuos, com o objetivo de explicar os métodos adotados e as decisões tomadas.

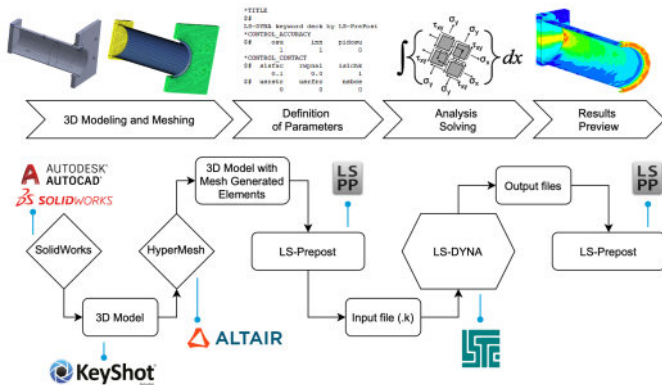


Figura 6 – Representação da metodologia aplicada.

C. Qualidade da Malha

Na fase da transformação do sólido em elementos finitos, um pormenor importante é a construção da malha. Uma malha muito simples com elementos de boa qualidade ou uma malha refinada com elementos de má qualidade pode criar uma análise mais lenta do que o necessário. Além disso, tende a criar uma distorção dos elementos. De acordo com o exemplo da Fig. 7, I) este ilustra o caso de uma malha simples cujo tempo de execução foi elevado (superior a 22 dias) e produziu maus resultados (erro $\approx 13\%$), enquanto que tanto II) como III) possuem malhas melhores, sendo mais rápida a obtenção de resultados (menos de 3 horas) e produzindo resultados mais precisos, sendo a última mais refinada (erro $\approx 2\%$).

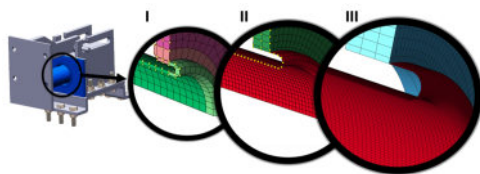


Figura 7 – Representação de três malhas diferentes.

D. Efeitos de Tensão-Deformação

Este é um problema altamente dinâmico. Assim, é importante considerar os efeitos da taxa de deformação. No material de aço escolhido (MAT003), esses efeitos são considerados ao definir os materiais constitutivos através dos parâmetros de Cowper-Symonds. Estes parâmetros têm sido

amplamente estudados, e há várias contribuições na literatura disponível, como se pode ver em Tab. 5.

TABELA 5: PARÂMETROS DE COWPER-SYMONDS PARA O AÇO.

Publication	C	P
Cowper & Symonds [36]	40.4	5
Abramowicz & Jones [37]	6844	3.91
Abramowicz & Jones [38]	802	3.585
Yu & Jones [39]	1.05E7	8.3
Marais et al. [40]	844	2.207
Jama et al. [41]	844	2.207
Sun & Packer [42]	3023	1.65

E. Métodos de Análise de Explosões Alternativos

Face aos custos elevados das análises, numa fase primária utilizaram-se métodos alternativos para simular a ação de explosões. Entre eles, o método da Geração de Velocidade Inicial (IVG). Este é um método alternativo que impõe uma velocidade inicial sobre os elementos selecionados. É um método eficiente para simular a deformação desejada, semelhante à criada pela explosão, observada nos testes de campanha experimental. Load Segment Set (LSS), um método alternativo mais apropriado e rentável foi utilizado posteriormente com modelos mais otimizados. Foi possível a sua utilização devido ao facto de possuir as curvas de pressão obtidas dos ensaios experimentais. Uma vez que este método aplica valores de pressão, não considera o ângulo de incidência na parede, nem o facto da propagação da onda de choque ser feito de forma esférica (Fig. 8). Estes efeitos ao longo do comprimento do painel não são considerados com este método, e tem uma influência ainda significativa no comportamento do sistema. No final, os resultados de ambas as velocidades do método eram voláteis, e a flutuação mínima poderia produzir desvios significativos que tornavam impossível calibrar o modelo sob o erro aceitável e recomendado de 10%.

F. Métodos de Análise de Explosões

LS-DYNA tem quatro métodos principais para modelar eventos de explosão, nomeadamente Load Blast Enhanced (LBE), Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE), uma combinação híbrida dos dois métodos mencionados (LBE e ALE), e Métodos de Partículas. Os métodos híbridos e de partículas tendem a ser utilizados para problemas mais complexos, tais como a resposta estrutural de uma estrutura, cenários com múltiplas interações de ondas de múltiplas explosões, e reflexos de ondas de explosão com o ambiente circundante [30], o que neste contexto não proporcionava um propósito válido para a sua aplicação. Por conseguinte, LBE foi o método utilizado.

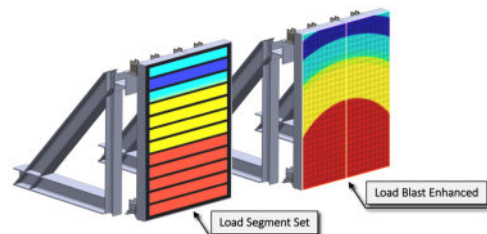


Figura 8 – Representação dos diferentes efeitos da explosão no painel, considerando diferentes métodos na análise.

G. Calibração e Validação dos Modelos

Durante o estudo numérico, foram feitos três tipos de geometrias de modelos. Primeiro tipo foi o “modelo de um quarto do conector” (abordagem inicial); segundo tipo, o “modelo completo do conector” (abordagem intermédia), e finalmente o “modelo completo do sistema” (abordagem final).

H. Calibração da Carga de Explosão

Considerando o explosivo utilizado e as suas características de explosão, existem diferenças em relação ao seu equivalente em TNT. Tornando-se um entrave, uma vez que este método requer a massa do explosivo em TNT. A solução foi a calibração da carga de explosão. Consiste no processo em que alterando numericamente a massa e a distância de TNT, foi possível alcançar efeitos semelhantes entre a simulação e os dados experimentais, particularmente a mesma da curva de pressões da ação da explosão.

I. Comparação

Através do benchmarking, com exemplos práticos progressivamente mais difíceis, foi possível aprender a utilizar o software, sendo crucial para compreender virtualmente como considerar as cargas de explosão em diferentes materiais constitutivos ou mesmo variáveis como a taxa de deformação, entre inúmeros outros aspetos necessários.

J. Convergência de Malha

Uma questão que é normalmente negligenciada e que afeta a precisão destes estudos numéricos é o estudo da convergência ou da sensibilidade das malhas. É frequentemente utilizada na análise de elementos finitos para assegurar que os resultados calculados convergem para a solução real, quer o problema em questão seja linear ou não linear, que os resultados são suficientemente exatos e que a qualidade da malha não influencia significativamente a solução final [21].

K. Experimentação

A experimentação é um método adicional que consiste no desenvolvimento do modelo numérico até que as suas análises comecem a produzir resultados semelhantes aos dados experimentais. Utilizado para calibrar e validar o modelo.

V. ANÁLISE NUMÉRICA

Neste momento, o modelo 3D foi criado e dividido em elementos. Posteriormente foram definidas as suas características, tendo no final sido submetido a métodos de calibração. Uma vez alcançada a calibração e validação do modelo, o que é uma boa indicação de que está correto, o estudo foi complementado com simulação. Portanto, neste capítulo, será realizada um estudo das soluções e ideias que não tenham sido testadas experimentalmente. Finalmente, foram retiradas conclusões.

A. Simulação 1: Análise de sensibilidade da variação do Módulo de Young

Em geral, todos os materiais sólidos não são elásticos lineares, especialmente quando são submetidos a altas taxas de deformação. Adicionalmente, a análise de explosão é altamente não linear, e este parâmetro não deveria ter muita influência nos resultados. O objetivo deste estudo foi confirmar esta hipótese.

Como se esperava, considerando todos os parâmetros em solução, o Módulo de Young não influencia significativamente o comportamento de desempenho dos conectores.

B. Simulação 2: Influência da Hinge

Uma característica interessante desta solução é o elemento hinge, soldado na placa presa ao painel. Era esperado que este elemento impedisse a perda de desempenho do sistema. Em geral, os valores de inversão total, velocidade e energia interna são mais elevados do que a solução comparada, confirmando a ideia inicial. Adicionalmente ainda reduz a amplificação da força sobre o impacto.

C. Simulação 3: Contacto entre elementos do Conector

Durante a análise anterior, destacaram-se alguns aspetos. Entre eles, o risco de contacto, entre os elementos. Assim, foi analisado o pior cenário, considerando a carga excêntrica, para avaliar com precisão se existe contacto entre os elementos, precisamente no local entre a superfície invertida do tubo e os seus bordos de placa adjacentes. Os dados dos resultados captam o efeito de deformação por flexão, numa fase inicial, para cargas mais baixas, em que o tubo deforma não só por mecanismos de inversão, mas também por mecanismo de flexão. Sendo este efeito mais pronunciado para cargas mais baixas e tendo uma melhor eficiência em tais cenários. Das várias tentativas apenas em uma se registou contacto, tendo apesar disso, obtido um melhor desempenho na absorção de energia que as restantes situações.

D. Simulação 4: Comportamento de Deformação

A partir dos resultados obtidos na simulação anterior, foram feitas algumas descobertas adicionais em relação ao desenvolvimento dos mecanismos de deformação do conector. Este pode apresentar deformação por mecanismo de flexão, de encurvadura ou um misto de transição entre os dois. Tendo simultaneamente mecanismo de deformação por inversão.

E. Simulação 5: Análise de Excentricidade

Uma das análises mais relevantes é a da excentricidade. Ela reforça a resiliência do sistema e confirma as ideias anteriores acerca dos mecanismos de deformação.

F. Simulação 6: Análise Completa do Sistema

Considerando os modelos deformáveis e rígidos completos do sistema, pode-se observar que os valores energéticos internos são mais elevados nos casos deformáveis. A capacidade do sistema é surpreendentemente boa, sendo virtualmente capaz de suportar cargas até 200 kg de TNT, onde se começou a verificar evidências de destruição parcial da parede (no lado posterior), simultaneamente com o esgotamento dos conectores.

VI. CONCLUSÕES

O presente trabalho pretende contribuir para a mitigação de ameaças derivadas dos explosivos, do terrorismo e outras ações humanas aos incidentes acidentais.

Com base nos resultados foi possível identificar os aspetos mais importantes para o desenvolvimento de um modelo

numérico, nomeadamente: i) é vantajoso considerar software potente, especializado e atual. Capaz de tornar o processo mais preciso e rápido, garantindo uma maior qualidade em tempo aceitável. O HyperMesh em específico, oferece funções automáticas de limpeza e construção de malha muito vantajosas, poupando tempo e evitando erros; ii) modelar a geometria com todo o detalhe pode ser um desperdício de tempo e de recursos; iii) a integridade do modelo, deve ser sempre confirmada para evitar erros na análise; iv) sendo um problema altamente dinâmico, é vital considerar parâmetros de tensão-deformação no modelo; v) benchmarking, convergência da malha e experimentação são métodos essenciais para criar um modelo digno de confiança.

No que diz respeito às análises, os aspetos mais relevantes foram: i) a análise numérica confirma a resiliência e eficiência da solução em condições adversas: a) quando o sistema tem excentricidades; b) quando há contacto entre elementos; c) quando ocorrem fenómenos de encurvadura; ii) os limites da deformação do conetor, são derivados do tubo deformável, que pode ser aumentado para certos comprimentos (condicionado pela possibilidade de fenómenos globais de encurvadura do tubo); iii) o comportamento por deformação do conetor pode ocorrer através de três mecanismos de deformação: a) para cargas mais baixas possui mecanismos de flexão e inversão; b) para cargas mais altas possui mecanismos de encurvadura e inversão; no intermédio, pode ser um efeito conjunto dos três; iv) o sistema de proteção tem o seu melhor desempenho para cargas até 100 kg de TNT. Após 200 kg, o conetor começa a esgotar a capacidade de absorção; v) para cargas severas que conduzem ao esgotamento da capacidade de absorção, se houver o elemento hinge, este reduz significativamente a amplificação de forças na estrutura protegida aquando do impacto; vi) teoricamente, quanto maior for a excentricidade, maior é a dissipação de energia; vii) o mecanismo de flexão requer valores reduzidos de esforços para ocorrer. Há assim uma maior facilidade em iniciar a deformação que resulta numa maior dissipação de energia, reduzindo os valores de pico de força; viii) o efeito composto dos mecanismos de deformação por flexão e/ou encurvadura e inversão, melhora o desempenho de absorção de energia; ix) os melhores resultados obtidos, foram através dos modelos onde ocorreram várias deformações plásticas diferentes, sem a rutura prematura destas últimas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] B. J. Buchanan, *Gunpowder, Explosives and the State: A Technological History*, 1st ed. Routledge, 2006.
- [2] M. Vergani, *How Is Terrorism Changing Us?: Threat Perception and Political Attitudes in the Age of Terror*. Palgrave MacMillan, 2018.
- [3] P. Gill, J. Horgan, and J. Lovelace, "Improvised explosive device: The problem of definition," *Studies in Conflict and Terrorism*, vol. 34, no. 9, pp. 732–748, 2011.
- [4] E. Miller, "Trends in Global Terrorism: Islamic State's Decline in Iraq and Expanding Global Impact; Fewer Mass Casualty Attacks in Western Europe; Number of Attacks in the United States Highest since 1980s," START - Study of Terroris and Responses of Terrorism, Tech. Rep. October, 2019.
- [5] D. Cormie, G. Mays, and P. Smith, *Blast Effects on Buildings*. London: ICE Publishing, Dec 2019.
- [6] K.U. Schmitt, P. F. Niederer, F. Walz, D. S. Cronin, B. Morrison, and M. H. Muser, *Trauma Biomechanics*, 5th ed. Springer, 2019.
- [7] P. W. Cooper, "Comments on TNT equivalence," *20th International Pyrotechnics Seminar*, p. 16, 1994.
- [8] S. D. Adhikary and S. C. Dutta, *Blast resistance and mitigation strategies of structures: Present status and future trends*. ICE Publishing, Apr 2019, vol. 172, ch. 4, pp. 249–266.
- [9] U.D. U.S. Department of Defense, *UFC 3-340-02*. Department of Defense - United States of America, 2008.
- [10] W. E. Baker, P. A. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulesz, and R. A. Strehlow, *Explosion Hazards And Evaluation*. Elsevier, 1983, vol. 5.
- [11] E. Yandzio and M. Gough, *Protection of Buildings against Explosions*. The Steel Construction Institute, 1999.
- [12] C. E. Needham, *Blast Waves*. Springer, 2018.
- [13] H. L. Brode, "A Calculation of the Blast Wave from a Spherical Charge of TNT, Rand Corp.," *Rep. RM-1965 (August 1957)*, p. 61, 1957.
- [14] C. Kingery, G. Bulmash, and U. A. B. R. Laboratory, *Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst*, ser. Technical report ARBRL. US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory, 1984.
- [15] X. Qiu and T. Yu, "Some topics in recent advances and applications of structural impact dynamics," *Applied Mechanics Reviews*, vol. 64, no. 3, 2011.
- [16] A. Baroutaji, M. Sajjia, and A.G. Olabi, "On the crash-worthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments," *Thin-Walled Structures*, vol. 118, pp. 137–163, 2017.
- [17] T. S. Pei, S. Nadiyah, S. Aishah, and N. Nadiyah, "Oblique Impact on Crashworthiness: Review," *International Journal of Engineering Technology and Sciences*, 2017.
- [18] G. Gomes, "Blast Protective Walls Optimization Design (BLADE) - Blast testing report - 10th June's Blast testing on Protective System inversion tubes 64x2mm, NATO Counter IED COE, Madrid Spain." Tech. Rep., 2020.
- [19] —, "Report of quasi-static inversion tests on thin-walled tubes", Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, Tech. Rep., 2019.
- [20] A. Harish, "What is Convergence in Finite Element Analysis?" 2020.
- [21] M. Okereke and S. Keates, *Finite Element Applications*. Springer, 2018.
- [22] M. Shuaib and O. Daoud, "Numerical modelling of reinforced concrete slabs under blast loads of close-in detonations using the lagrangian approach," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 628, p. 180, 2015.
- [23] G. R. Cowper and P.S. Symonds, "Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams," 1957.
- [24] "Dynamic axial crushing of circular tubes," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 263–281, 1984.
- [25] W. Abramowicz and N. Jones, "Dynamic progressive buckling of circular and square tubes," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 243–270, 1986.
- [26] Y. Jilin and J. Norman, "Further experimental investigations on the failure of clamped beams under impact loads," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 27, no. 9, pp. 1113–1137, 1991.
- [27] S. Marais, R. Tait, T. Cloete, and G. Nurick, "Material testing at high strain rate using the split hopkinson pressure bar," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 1, p. 20, 06 2004.
- [28] H. Jama, M. Bambach, G. Nurick, R. Grzebieta, and X.L. Zhao, "Numerical modelling of square tubular steel beams subjected to transverse blast loads," *Thin-Walled Structures*, vol. 47, pp. 1523–1534, 12 2009.
- [29] M. Sun and J. Packer, "High strain rate behaviour of cold-formed rectangular hollow sections," *Engineering Structures*, vol. 62–63, p. 181–192, 03 2014.
- [30] J. Trajkovski, "Comparison of MM-ALE and SPH methods for modelling blast wave reflections of flat and shaped surfaces," *11th European LS-DYNA User-Conference, Salzburg, Austria*, no. May 2017, p. 15, 2017.