



**Ricardo Jorge
de Sousa Clérigo**

**Resposta Dinâmica de Alvos Com Núcleos de
Espuma Revestida**



**Ricardo Jorge
de Sousa Clérigo**

**Resposta Dinâmica de Alvos com Núcleos de
Espuma Revestida**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, Professor Doutor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Robertt Angelo Fontes Valente, Professor Doutor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

*"Nothing in life is to be feared.
It is only to be understood."*

Marie Curie (1867-1934)
Prémio Nobel da Física 1903

o júri

presidente

Professor Doutor Rui António da Silva Moreira
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutora Isabel Maria Alexandrino Duarte
Investigadora da Universidade de Aveiro

Professor Doutor António Joaquim Mendes Ferreira
Professor Associado com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias
Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)

Professor Doutor Robertt Angelo Fontes Valente
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (co-orientador)

agradecimentos

Aos Professores Filipe Teixeira-Dias e Robertt Valente, Professores e Orientadores pela sabedoria, apoio e constante optimismo transmitidos ao longo do meu percurso académico.

À Engenheira Mariana Paulino, pela imensa ajuda e total disponibilidade durante a realização deste projecto.

À Natércia e a todos os meus amigos próximos, pela motivação que me deram e, principalmente pelos momentos de descontração que partilhámos.

Aos meus pais e família pelos valores que me transmitiram e pelo incondicional apoio ao longo de toda a minha vida.

palavras-chave

Estrutura *sandwich*, material celular, espuma de alumínio, revestimento, impacto balístico, absorção de energia, Método dos elementos finitos.

resumo

Cada vez mais se torna necessário desenvolver sistemas de protecção contra diversos tipos de ameaças, sejam estas aéreas, terrestres, militares ou civis. A missão dos investigadores é criar e desenvolver sistemas de defesa que sejam eficazes na protecção contra ameaças de diversos tipos, sob várias condições e que sejam confortáveis e cada vez mais leves. Estes investigadores têm que considerar factores como o material, as suas propriedades mecânicas, a sua densidade e composição, os métodos de produção entre muitos outros factores. Neste trabalho procura-se verificar os efeitos do impacto de um projectil em alvos constituídos por estruturas *sandwich* usando como núcleo, espumas de alumínio revestidas com níquel. Desenvolve-se um estudo numérico detalhado onde se alteram parâmetros como a configuração geométrica dos alvos, a porosidade e revestimento das espumas de alumínio, utilizando a ferramenta de simulação LS-Dyna™, baseada no método dos elementos finitos. Apresentam-se as características dos materiais usados nas simulações e os procedimentos efectuados durante a construção dos vários modelos numéricos. Os resultados mostram que todos os ensaios numéricos realizados coincidem com os experimentais. Conclui-se que a espuma de 30 ppi é mais eficaz que a de 10 ppi, que o revestimento de níquel aumenta a capacidade de absorção de energia, e que a estrutura *sandwich* com três camadas de espuma envoltas em quatro placas de blindagem distribui a força sofrida de uma forma radial e uniforme. Observa-se que não existe destruição total de nenhum dos alvos testados, e verifica-se também que o aumento da velocidade de impacto do projectil de $v_{min} = 300$ m/s para $v_{max} = 525$ m/s piora o desempenho do alvo em 3%. Finalmente são realizadas simulações onde se substitui o projectil esférico por *fragment simulating projectiles* (FSP) de diferentes dimensões. É registada a velocidade e energia necessárias para cada um dos FSP penetrar o alvo na sua totalidade.

keywords

Celular material, aluminum foam, coating, ballistic impact, energy absorption, finite elements method

abstract

Nowadays, it becomes more and more necessary to develop protection systems against different types of threats that may come from the air, land, military or civilian. The investigators mission is to develop defense systems that are effective on protecting people from those threats, and also lighter and more comfortable. These investigators must take in consideration parameters such as materials, their mechanical properties, densities, composition, and production methods among many others. The objective of this work is to verify the effects of ballistic impacts of projectiles in sandwich structures with nucleus made of aluminum foam coated with nickel. A detailed numerical study is developed recurring to the finite element method based software LS-Dyna™, where parameters like geometric configuration, density of the foam, coating, are altered, and shown the influence of those variables to the energy absorption capability of the structure. The results obtained numerically are in good agreement with the experimental ones. It is possible to conclude that the most dense foam (30 ppi) is more effective than the 10 ppi one, the nickel coating improves energy absorption, and the usage of three layers of foam and four sheets of aluminum distributes the energy in a more uniform and radial way. It can also be verified that increasing the velocity of the projectile from $v_{min} = 300$ m/s to $v_{max} = 525$ m/s affects the performance of the target in 3%. Finally, simulations are made replacing a sphere shaped projectile with different size fragment simulating projectiles (FSP) and is shown the necessary velocity and energy given to these types of projectiles to fully penetrate the target.

Conteúdo

I	Enquadramento e objectivos	1
1	Enquadramento e estado da arte	3
1.1	Introdução	3
1.1.1	Introdução à balística	4
1.1.2	Espuma de alumínio	5
1.1.3	Revestimento	5
1.1.4	Estruturas <i>sandwich</i>	6
1.1.5	Simulação numérica	8
2	Objectivos	11
3	Guia de leitura	13
II	Testes de impacto balístico	15
4	Procedimentos e métodos	17
4.1	Testes com projectil esférico	17
4.1.1	Procedimentos experimentais	17
4.1.2	Modelação em LS-Dyna TM	19
4.2	Testes com projecteis FSP	25
4.2.1	Procedimentos	27
4.2.2	Modelação em LS-Dyna TM	27
III	Apresentação e discussão de resultados	31
5	Análise experimental e numérica	33
6	Desempenho das estruturas estudadas	41
7	Influência da velocidade do projectil	47

Conteúdo	xvi
8 Impacto de FSP	51
IV Considerações finais	55
9 Conclusões	57
Lista de Figuras	61
Lista de Tabelas	65
Bibliografia	67

Parte I

Enquadramento e objetivos

Capítulo 1

Enquadramento e estado da arte

1.1 Introdução

Na última década, a preocupação com os problemas estruturais associados ao impacto balístico tem vindo a aumentar significativamente nas sociedades modernas. Porém, os processos de penetração e perfuração de alvos metálicos são processos de análise muito complexos, quer do ponto de vista experimental, quer analítico ou até mesmo numérico. Consequentemente, com o intuito de validar cálculos teóricos e modelos numéricos, é extremamente útil realizar testes de perfuração quase-estáticos, onde algumas incertezas associadas ao material, tais como, por exemplo, características que influenciam a inércia ou propriedades relacionadas com as velocidades de deformação, são difíceis de obter. No entanto, não é possível estabelecer soluções analíticas totalmente fiáveis para problemas estruturais. Por outro lado, a utilização de métodos de simulação numérica, como o método dos elementos finitos (MEF), tem vindo a facilitar a obtenção de soluções para a resolução de tais problemas estruturais. Para que esta abordagem seja capaz de representar o comportamento real de uma estrutura quando exposta a uma solicitação dinâmica, são necessárias medidas exactas (experimentais) dos processos de deformação.

A escolha do melhor material a ser utilizado em sistemas de protecção contra balística é de extrema importância, tendo que permitir, quer a melhor mobilidade possível, quer a segurança dos seus utilizadores [Netto 06]. Foram variados os estudos realizados até à data sobre selecção dos melhores materiais. O aço continua a ser a opção mais utilizada para aplicações de defesa, apesar da sua elevada densidade ser frequentemente um grande inconveniente. A utilização de ligas de titânio também tem grande potencial, porém, a sua aquisição é relativamente dispendiosa [Paulino 09]. Por outro lado, os materiais celulares metálicos, principalmente os de matriz de alumínio, têm vindo a revelar excelente desempenho em várias áreas da indústria, incluindo a defesa

[Gama 01]. A procura por reduções de massa em veículos blindados e possível aumento da protecção de impacto de projecteis, levou ao desenvolvimento e projecto de novos veículos que usam estruturas *sandwich* com núcleo constituído por espumas metálicas [Jerz 03]. A utilização destes materiais oferece um vasto leque de propriedades, tais como elevada resistência específica, baixa densidade, grande capacidade de absorção de energia, boa protecção electromagnética e redução de vibrações, as quais não poderiam ser obtidas segundo abordagens de construção mais convencionais.

Nos pontos que se seguem, procede-se a uma descrição mais detalhada sobre a balística, espumas metálicas e estruturas *sandwich*.

1.1.1 Introdução à balística

A balística é a ciência que estuda a propulsão, movimento e impacto de corpos lançados ao ar livre. Esta ciência surge associada ao disparo de projecteis através de armas de fogo. Os princípios inerentes à balística permitem analisar a trajectória, o impacto, as marcas e a explosão de um projectil. É possível analisar o movimento balístico como uma composição de vários movimentos. Segundo o movimento vertical, o projectil está exposto a um movimento rectilíneo variado, devido à aceleração da gravidade. Do ponto de vista do movimento horizontal, o projectil sofre um deslocamento uniforme, uma vez que não existe nenhuma aceleração nesta direcção. Como ciência que estuda o comportamento e os efeitos mecânicos produzidos por projecteis, a balística pode ser subdividida em três componentes distintas: balística interna, balística externa e balística terminal [Jussila 05]. A balística interna (também conhecida como balística interior) estuda os mecanismos de propulsão e movimento do projectil dentro de um dispositivo de disparo. A balística externa analisa os processos que ocorrem no projectil desde o instante de saída da arma até ao instante em que atinge o alvo, isto é, ao estudo do movimento de um projectil durante o voo. Ao viajarem pelo ar, os projecteis estão sujeitos a alterações provocadas pelo vento, resistência do ar e força da gravidade. Estas forças induzem uma alteração do movimento, influenciando assim o percurso a seguir pelo projectil, designado por trajectória. A trajectória varia com a massa, a forma, a velocidade e ângulo de disparo do projectil. A forma geral de uma trajectória é descrita como uma parábola, sendo a distância total percorrida por um projectil designada por alcance. Finalmente, a balística terminal estuda o comportamento do projectil após o impacto com o alvo, e é caracterizada pela ocorrência de eventos rápidos, de elevadas pressões e grandes taxas de deformação.

Depois de disparado, o projectil deve possuir uma quantidade significativa de energia cinética para atingir o alvo, penetrá-lo e executar a sua tarefa.

Durante muitos anos o estudo da balística baseou-se em mitos ou suposições sem base

científica. Nas últimas décadas o estudo da balística tem evoluído de forma consistente. Muitas das descobertas devem-se ao desenvolvimento de tecnologia como a de fotogramas de alta velocidade e do estroboscópio. Estes dispositivos têm permitido o estudo aprofundado da movimentação de projecteis, desde que são disparados até o instante em que atingem o alvo.

1.1.2 Espuma de alumínio

Os materiais celulares são uma classe de material relativamente nova [Jung 09a]. Caracterizam-se por possuírem um grande volume de poros repletos de ar na sua estrutura. Oferecem uma baixa densidade e devido à sua elevada rigidez específica (em relação ao peso), mostram potencial para absorção de energia e amortecimento [Ashby 00]. Existem dois tipos de materiais celulares, os de célula aberta, onde se verificam conexões entre os poros e os de célula fechada, que contêm poros fechados. Na figura 1.1 estão representados exemplos de espuma de alumínio de célula aberta e fechada.

As espumas de alumínio apresentam um conjunto de propriedades interessantes como, por exemplo, baixa densidade, elevada rigidez, resistência e capacidade de absorção de energia. Estas propriedades tornam estes materiais celulares ideais para aplicação no desenvolvimento de sistemas de segurança [Jerz 03]. A estrutura celular oferece-lhes a capacidade de suportar grandes deformações mantendo níveis de tensão quase constantes (patamar) e por isso são materiais com forte aplicação em sistemas de absorção de energia de impacto. No âmbito do trabalho realizado, foram utilizadas duas espumas de alumínio de célula aberta, fabricadas em liga de alumínio $AlSi7Mg03$, cujas densidades variam entre os 10 poros por polegada (10 ppi) e 30 poros por polegada (30 ppi).

1.1.3 Revestimento

Como referido anteriormente, as espumas de alumínio têm vindo a ser alvo de muitos estudos, devido à potencialidade de formarem estruturas ultra-leves e com rigidez específica elevada. Porém, o alumínio e suas ligas possuem uma rigidez (absoluta) relativamente baixa, têm uma temperatura de fusão muito baixa, e em alguns casos fraca resistência à corrosão, daí a utilização de espumas de alumínio se limitar a aplicações à temperatura ambiente e que não sejam sujeitas a esforços elevados.

Uma forma de melhorar as propriedades de um material é reforçá-lo com outro que exhiba melhores características. Boonyongmaneerat *et al.* [Boonyongmaneerat 08] estudaram os efeitos do uso de revestimentos de Ni-W com várias espessuras aplicados

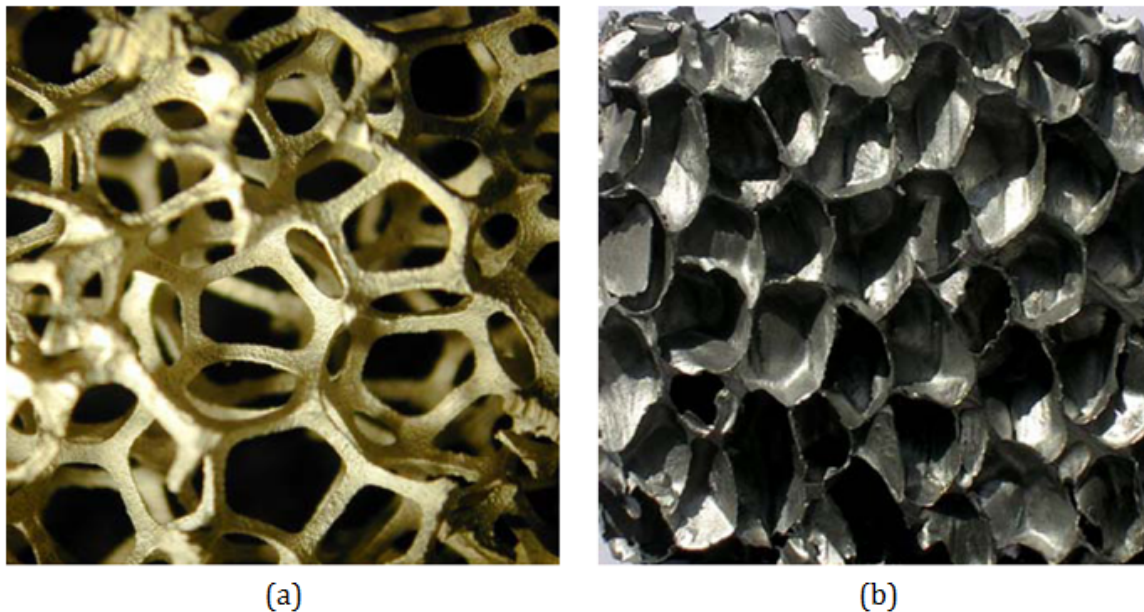


Figura 1.1: Exemplo de materiais celulares de: (a) célula aberta e (b) célula fechada [Jung 09b].

em espumas metálicas, tendo concluído que os revestimentos aumentam significativamente quer a resistência, quer a capacidade de absorção de energia sem aumentar drasticamente a densidade da espuma. Jung *et al.* [Jung 09a] verificaram também recorrendo a testes quase-estáticos em espumas de alumínio de célula aberta que o uso de diferentes espessuras de revestimentos provocam alterações na força de compressão necessária para deformar o material e, conseqüentemente, na sua capacidade de absorção de energia.

Variadas técnicas podem ser usadas para realizar a aplicação de revestimentos. No caso das espumas utilizadas neste trabalho, a técnica adoptada foi a electrodeposição. Este procedimento consiste na aplicação de revestimentos metálicos em superfícies condutoras a temperaturas relativamente baixas. Enquanto a electrodeposição é usada à décadas em materiais monolíticos, a sua aplicação em materiais celulares é relativamente recente, e os avanços tecnológicos nesta área tem sido focados maioritariamente em revestimentos com base de níquel.

1.1.4 Estruturas *sandwich*

Como referido anteriormente, a utilização de estruturas laminadas é prática comum na construção de veículos nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, bem como nas indústrias civil e mecânica [Librescu 00]. Um exemplo típico destas estruturas é a construção tipo *sandwich*. A geometria mais comum assenta em três camadas distintas. Duas delas, designadas por placas de blindagem ou *sheets*, são as faces exteriores,

constituídas por placas finas que se encontram separadas por uma camada intermédia que se designa como núcleo ou *core*. Enquanto as faces exteriores são normalmente constituídas em materiais rígidos (aço, alumínio, *etc.*), o núcleo é feito de materiais mais leves e consideravelmente menos rígidos que as faces, nomeadamente borracha porosa, espumas metálicas ou poliméricas.

As espumas metálicas oferecem boa resistência, boa capacidade de absorver energia, isolamento sonoro e térmico, mas tendo sempre uma densidade reduzida. Esta gama de propriedades tem vindo a aumentar o interesse por este tipo de espumas, como substituto de espumas poliméricas usadas nas estruturas *sandwich*. Na figura 1.2 está representado uma estrutura *sandwich* com núcleo em espuma de alumínio.



Figura 1.2: Exemplo de estrutura *sandwich* com núcleo em alumínio [Banhart 00].

Estas estruturas são estudadas por inúmeros investigadores, de forma a comprovar as propriedades das mesmas e verificar a influência de vários parâmetros na sua capacidade de absorção de energia. De seguida referenciam-se apenas alguns estudos relevantes realizados até à data. Goldsmith e Sackman [Goldsmith 92] testaram a influência de vários parâmetros, tais como a velocidade de impacto, condições fronteira e tipos de contacto entre o núcleo de espuma e placas exteriores na dissipação de energia durante a perfuração. Mines *et al.* [Mines 98] examinaram o comportamento a baixa velocidade da perfuração de estruturas do mesmo tipo e sugeriram que velocidades de impacto mais elevadas tendem a aumentar a capacidade de absorção de energia, o que é atribuído a um aumento da força de esmagamento do núcleo e às forças que causam rotura das placas exteriores em altas taxas de deformação. Mais recentemente, Vil-

lanueva e Cantwell [Villanueva 04] reportaram excelentes valores de energia absorvida para impactos balísticos a velocidades de impacto elevadas e reduzidas em estruturas *sandwich* com núcleo de espuma de alumínio reforçadas com materiais compósitos.

Uma fracção significativa da energia absorvida é atribuída à ductilidade da espuma. Styles *et al.* [Styles 07] também chegaram à conclusão que uma estrutura *sandwich* com núcleo de espuma de alumínio exhibe menos danos locais e menos falhas nos elementos que os polímeros aquando de impacto. Zhao *et al.* [Zhao 07] testaram o comportamento do núcleo de espuma de alumínio em estruturas deste tipo com placas de blindagem em liga de alumínio a testes de barra de Hopkinson, e registaram um historial da penetração. Embora a capacidade de absorção de energia seja uma característica importante, a característica mais relevante de uma estrutura *sandwich* é a elevada rigidez à flexão, com ligeiro aumento do peso total da estrutura, o que se deve à baixa densidade do núcleo. Porém, a natureza celular das espumas de alumínio, cria um problema quando se tenta prever o seu comportamento mecânico. As propriedades deste tipo de materiais dependem essencialmente do tamanho dos poros e da geometria da espuma em estudo.

1.1.5 Simulação numérica

A simulação numérica é actualmente utilizada em problemas muito diversos. Comportamentos de materiais, análise de vibrações, conformação plástica de materiais, são apenas alguns exemplos de aplicações desta ferramenta. Em todo o processo de criação de um modelo a estudar numericamente é essencial definir todos os parâmetros envolvidos no problema. A geometria, propriedades de materiais, condições iniciais, de fronteira e cargas a que o sistema possa estar sujeito, são alguns dos parâmetros a ter em conta, que influenciam o resultado final [Teixeira-Dias 09]. Na figura 1.3 pode observar-se um exemplo de simulação numérica, mais especificamente do impacto de um projectil rígido num alvo de espessura de 5 mm [Grilo 09]. De notar que todos os componentes do alvo e projectil foram discretizados em elementos finitos. Esta técnica utiliza-se devido à complexidade do estudo do sistema como um todo. O utilizador tem a possibilidade de analisar apenas parte do modelo computacional, mais simples, obtendo assim uma solução para o problema. Após este primeiro passo, poderá adicionar complexidade ao modelo de modo a obter soluções mais próximas da realidade.

O método dos elementos finitos (MEF) é um método matemático de análise e resolução, quase sempre aproximada, de problemas científicos e de engenharia. De uma forma geral, o MEF procura soluções para problemas complexos para os quais não existe solução analítica exacta. A aplicação deste método numérico exige muitas vezes a disponibilidade de meios computacionais significativos e, por esse motivo, verifica-se

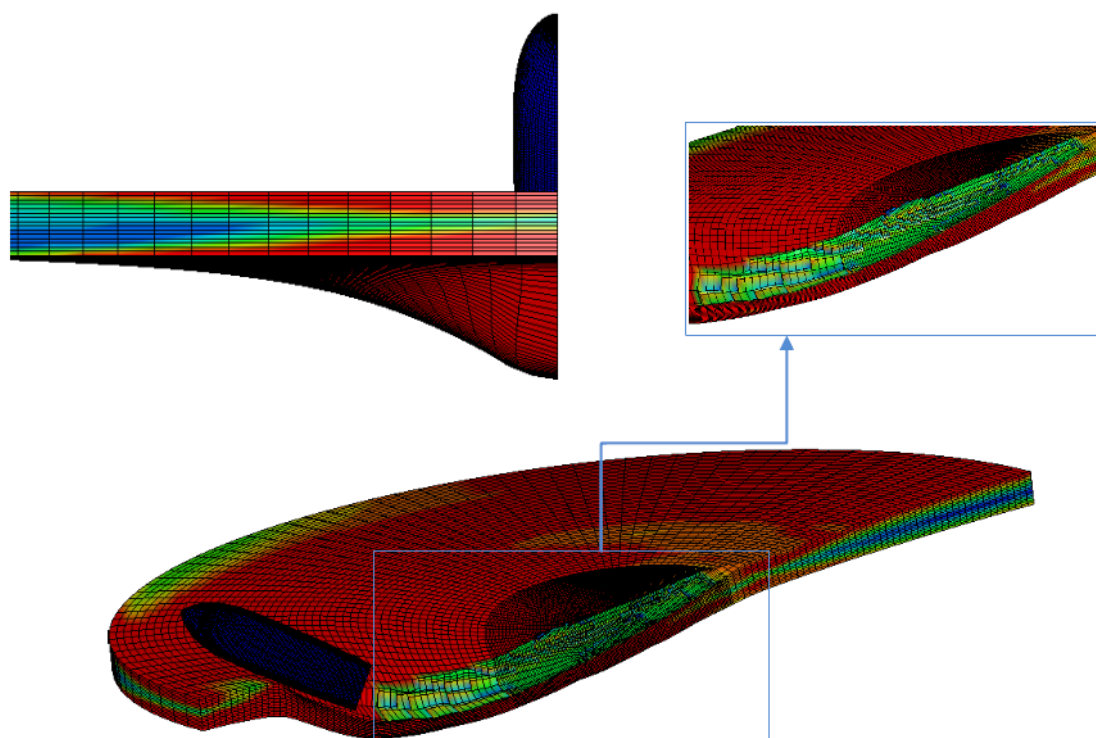


Figura 1.3: Exemplo da distribuição de tensões equivalente de von Mises para uma simulação numérica de impacto ortogonal e de um impacto a 80° , de um projectil rígido $7,62 \times 51$ [mm] NATO num alvo de espessura de 5 mm [Grilo 09].

que a evolução deste método ao longo dos anos foi sempre dependente da evolução da tecnologia e da capacidade de cálculo deste meios. Presentemente, o MEF é aplicado em diversas áreas da ciência e engenharia, como referido anteriormente. Esta ferramenta de auxílio à resolução de problemas numéricos, pode ser encarada de duas perspectivas muito diferentes: (i) o ponto de vista do utilizador e (ii) o ponto de vista do programador. O utilizador, hoje em dia possui à sua disposição vários programas de simulação numérica baseados no método dos elementos finitos. É importante que domine os processos físicos que pretende estudar, bem como as especificações requerida à aplicação do método. Numa primeira fase, o sistema a ser estudado é dividido num número finito de segmentos, áreas ou volumes mais pequenos, designados por elementos finitos. A este processo dá-se o nome de discretização. Os elementos finitos podem assumir variadas formas. Como exemplo, podem referir-se os segmentos para uma análise unidimensional e hexaedros para análise tridimensional. É de notar que existem muitas outras formas para elementos finitos, as suas utilizações dependem da geometria do sistema. O programador de códigos de simulação usa o método dos elementos finitos como base do seu trabalho. De um modo geral estes são um conjunto de equações diferenciais que representam os fenómenos físicos a analisar. A manipulação dessas equações permite encontrar novas e melhoradas soluções numéricas para

problemas sem resolução, ou com resolução analítica muito complexa.

Capítulo 2

Objectivos

Com este trabalho pretende-se estudar o comportamento dinâmico de alvos com núcleo em espumas de alumínio revestidas e verificar a viabilidade da utilização destes materiais e estruturas em sistemas de protecção. Estes componentes têm como principal função absorver a máxima energia possível e, potencialmente, impedir a penetração/perfuração de projecteis disparados contra os mesmos. Para tal, são efectuados estudos numéricos de impactos balísticos em alvos com características diferentes e são analisadas as velocidades dos projecteis e capacidade de absorção energética dos vários alvos. Assim, de uma forma estruturada, os objectivos do trabalho aqui proposto são os seguintes:

- Estudar a capacidade de absorção de energia de estruturas *sandwich* usadas como alvos durante do impacto de um projectil.
- Verificar as variações das velocidades residuais dos projecteis e capacidade de absorção de energia dos alvos segundo a alteração dos seguintes parâmetros:
 - O número de placas de blindagem e espessura do núcleo das estruturas.
 - A aplicação de um revestimento de níquel no núcleo de espuma.
 - A densidade da espuma.
 - A velocidade do projectil.
- Avaliar a velocidade e energia necessárias para existir perfuração do alvo aquando do disparo de fragmentos de explosão com dimensões diferentes.

Capítulo 3

Guia de leitura

Esta dissertação é composta por quatro partes. De seguida são descritos resumidamente os conteúdos de cada parte, de forma a fornecer ao leitor um guia de leitura.

Enquadramento e objectivos

Nesta primeira parte apresentam-se os objectivos globais do trabalho, referem-se tópicos envolvidos e tratados durante o desenvolvimento da dissertação, explicam-se os conceitos relacionados com a balística e referem-se os materiais que constituem os alvos utilizados nas simulações numéricas de impacto balístico.

Testes de impacto balístico

Neste capítulo caracterizam-se os ensaios experimentais e realizam-se simulações numéricas em LS-DynaTM. As simulações são realizadas de acordo com especificações pré-definidas, isto é, realizam-se simulações para diferentes espumas de alumínio com e sem revestimento, definem-se também modelos de comportamento dos materiais, condições de fronteira e outras condições adoptadas para a obtenção de resultados numéricos.

Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo do trabalho, são confrontados e discutidos os resultados obtidos através da realização de simulações numéricas para as diferentes espumas utilizadas. Serão considerados os factores mais relevantes em termos de absorção de energia de impacto, nomeadamente a absorção de energia, e velocidade de saída (velocidade residual) do projectil.

Considerações finais

Neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais e discutem-se os resultados obtidos na realização deste trabalho.

Parte II

Testes de impacto balístico

Capítulo 4

Procedimentos e métodos

4.1 Testes com projectil esférico

Neste capítulo caracterizam-se os ensaios experimentais e descrevem-se as simulações numéricas realizadas em LS-DynaTM. Realizam-se simulações de impacto com um projectil esférico em alvos com núcleos de diferentes espumas de alumínio, definem-se também modelos de comportamento dos materiais, condições de fronteira e outras condições adoptadas para a obtenção de resultados numéricos.

4.1.1 Procedimentos experimentais

De modo a verificar a eficácia e a viabilidade da utilização das espumas de alumínio de célula aberta revestidas com níquel como material para absorção de impacto balístico, é necessário averiguar se estes materiais apresentam vantagens significativas em relação aos seus homólogos sem revestimento e utilizados para o mesmo efeito. Para tal, foram seleccionados quatro materiais celulares com características e comportamentos distintos: duas espumas de alumínio com dez poros por polegada (10 ppi), com e sem revestimento de níquel, e duas espumas de alumínio com trinta poros por polegada (30 ppi), igualmente com e sem revestimento de níquel.

Como em todos os projectos científicos, a componente teórica deverá ser sempre acompanhada de testes experimentais que validem os resultados. Os ensaios balísticos que se pretendem simular neste trabalho foram realizados experimentalmente por investigadores do *French-German Research Institute of Saint-Louis* (ISL) e da *Universität des Saarlandes*.

Na figura 4.1 pode observar-se o esquema da montagem dos ensaios balísticos realizados. É utilizada uma arma de ar comprimido para efectuar o disparo de um projectil esférico construído em aço inoxidável (DIN10088). O controlo de velocidade é feito por duas

barreiras de luz que fazem disparar a câmara de alta velocidade que regista as imagens dos impactos. O suporte dos alvos pode ser observado em mais detalhe na figura 4.2.

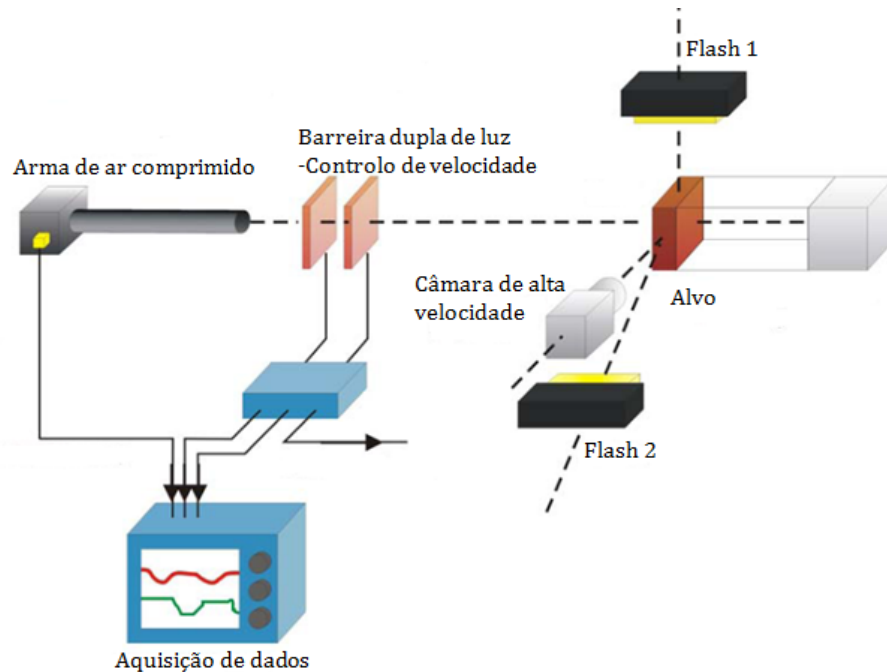


Figura 4.1: Representação esquemática da configuração experimental dos ensaios balísticos realizados no ISL [Jung 09b].

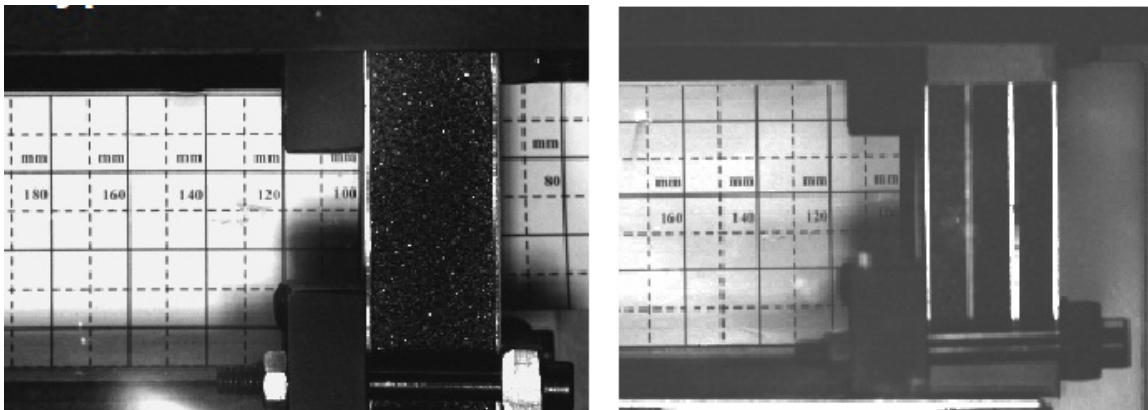


Figura 4.2: Sistema de suporte dos alvos utilizados nos impactos balísticos realizados [Jung 09b].

Em termos de estruturas *sandwich* usadas como alvos, foram utilizadas duas estruturas diferentes para cada um dos materiais. A primeira consistiu num bloco paralelepípedo com dimensões $100 \times 100 \times 30$ [mm³], posicionado entre duas placas de alumínio com 1 mm de espessura cada. A segunda configuração consistiu em três blocos com dimensões $100 \times 100 \times 10$ [mm³], separados por quatro placas de alumínio com as mesmas dimensões da estrutura anterior. As quatro configurações são as que se podem ver na

figura 4.3. Em cada um dos ensaios foi disparado um projectil esférico a uma velocidade inicial $v_0 = 300$ m/s.

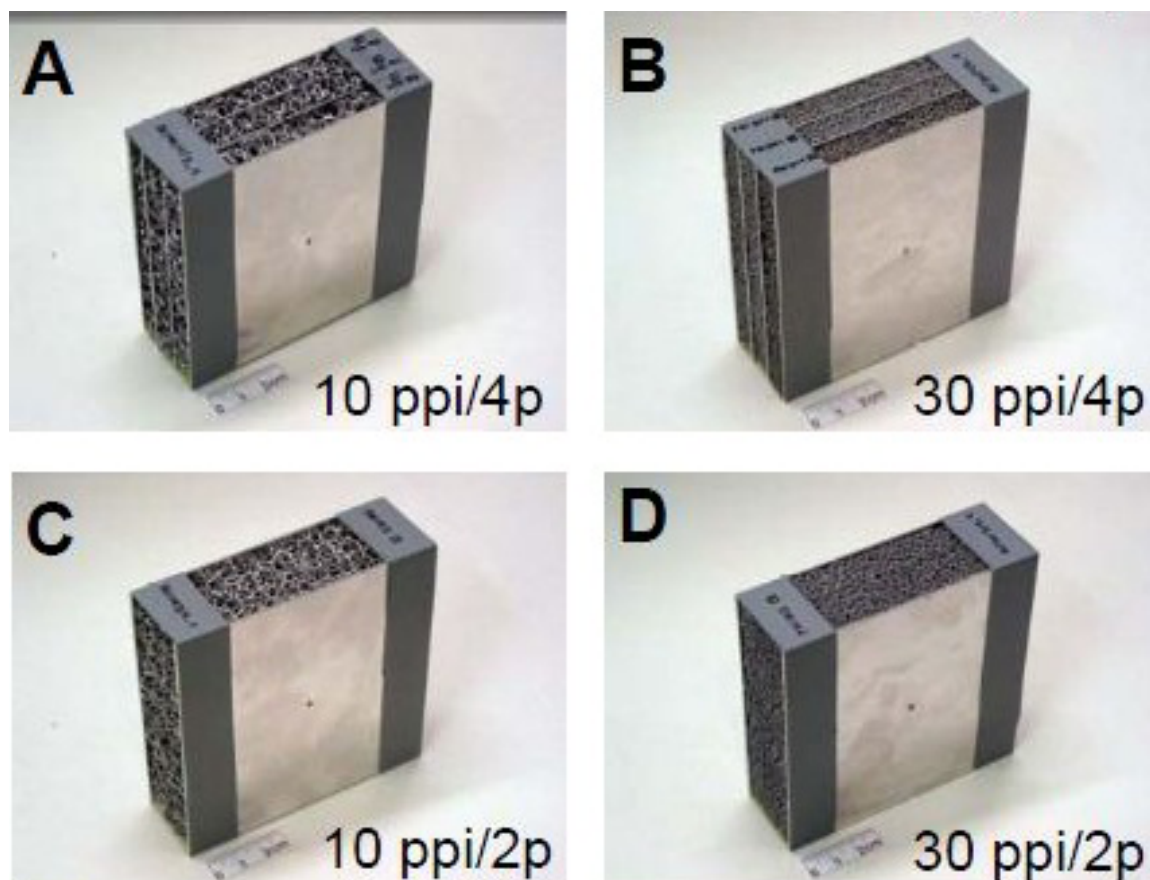


Figura 4.3: Configurações das estruturas *sandwich*: (a) Configuração de quatro placas de blindagem com núcleo em espuma de alumínio 10 ppi (EA10SR/Ni4P): (b) Configuração de quatro placas de blindagem com núcleo em espuma de alumínio 30 ppi (EA30SR/Ni4P): (c) Configuração de duas placas de blindagem com núcleo em espuma de alumínio de 10 ppi (EA10SR/Ni2P): (d) Configuração de duas placas de blindagem com núcleo em espuma de alumínio de 30 ppi (EA30SR/Ni2P) [Jung 09b].

De modo a confirmar a capacidade de absorção de energia de cada configuração, utilizando as diferentes espumas, foram registadas as velocidades à saída do alvo do projectil em cada um dos ensaios.

4.1.2 Modelação em LS-DynaTM

A implementação e configuração dos ensaios de simulação numérica é realizada no programa de pré-processamento LS-PrePostTM, associado ao LS-DynaTM. É neste programa que se define a geometria do problema, as condições de fronteira e todos os parâmetros de modelação do ensaio numérico.

Devido à complexa variedade de ensaios realizados ao longo de todo este trabalho,

foi necessário recorrer a referências alfa-numéricas para os designar, em concordância com a configuração de cada um. As referências iniciam-se sempre por oito caracteres maiúsculos referentes ao alvo utilizado. Assim, cada ensaio de simulação numérica realizado será designado por uma sigla alfa-numérica definida do seguinte modo:

EAXXRRXP

em que EA é a abreviação de espuma de alumínio XX representa o número de poros por polegada da espuma em estudo; LL indica o revestimento da espuma e finalmente, XP significa o número de placas de alumínio que a configuração possui. A título de exemplo, a referência EA10Ni2P designa um ensaio realizado sobre um bloco de espuma de alumínio com 10 poros por polegada com revestimento de níquel numa estrutura *sandwich* com duas placas de alumínio. As designações de cada ensaio podem ser observadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Materiais utilizados na caracterização do comportamento mecânico ao impacto e respectivas siglas.

Material	Sigla
Espuma de alumínio com 10 ppi sem revestimento	EA10SR2P EA10SR4P
Espuma de alumínio com 30 ppi sem revestimento	EA30SR2P EA30SR4P
Espuma de alumínio com 10 ppi revestida com níquel	EA10Ni2P EA10Ni4P
Espuma de alumínio com 30 ppi revestida com níquel	EA30Ni2P EA10Ni4P

Configuração geométrica dos modelos numéricos

De forma a simular o impacto do projectil nos alvos, foram criadas estruturas *sandwich* discretizadas em elementos finitos, com as mesmas dimensões dos alvos utilizados nos ensaios experimentais. Nas placas de blindagem optou-se por utilizar elementos do tipo casca com quatro pontos de integração pois a utilização deste tipo de elementos em estruturas com espessura muito reduzida reduz o tempo de cálculo quando comparado com o uso de elementos sólidos. Para a discretização das espumas, escolheram-se elementos sólidos hexaédricos de oito nós, com três graus de liberdade por nó e oito pontos de integração. A utilização de um elemento totalmente integrado, como este, aumenta o tempo de cálculo numérico mas minimiza a possibilidade de aparecimento de modos de deformação do tipo *hourglass* (modos de energia nula), levando a uma maior confiança nos resultados obtidos [Hallquist 98]. Na figura 4.4 podem observar-se os alvos modelados no LS-PrePostTM.

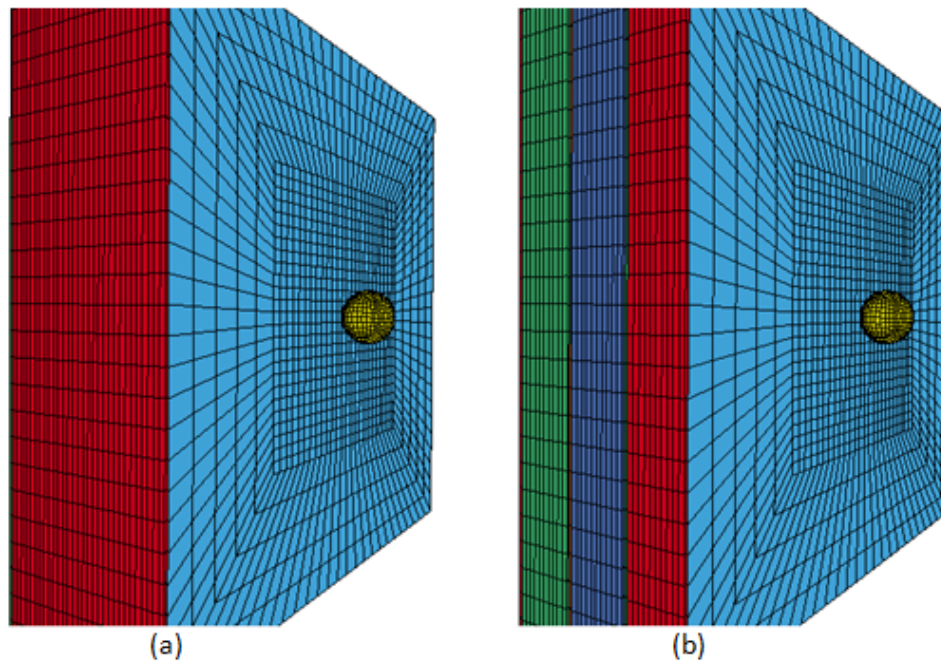


Figura 4.4: Estruturas *sandwich* discretizadas em elementos finitos: (a) Alvo com duas placas de blindagem, (b) Alvo com quatro placas de blindagem.

Modelos de comportamento dos materiais

Os modelos de comportamento dos materiais são essenciais ao modelo numérico. É consoante o modelo escolhido que se define a maneira como o material se comporta. Logo, é de extrema importância efectuar uma correspondência correcta entre o modelo escolhido e o tipo de material em estudo, de modo a que os resultados obtidos sejam de confiança.

O modelo de comportamento escolhido para as placas de alumínio bem como para o projectil foi o modelo *MAT_PLASTIC_KINEMATIC. Este é um modelo bi-linear elástico-plástico, que contém formulações que combinam isotropia com encruamento cinemático. Os parâmetros necessários na sua definição são: a densidade do material (ρ), o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (μ) e a tensão limite de elasticidade (σ_y). As propriedades do alumínio utilizado nas placas de blindagem e do aço inoxidável que compõe o projectil, encontram-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Propriedades dos materiais utilizados nas placas de blindagem e projectil.

Propriedades Mecânicas	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	σ_y [MPa]	μ
Alumínio	2,7	70	23	0,33
Aço Inoxidável (DIN10088)	7640	220	615	0,33

O modelo de comportamento utilizado para as espumas foi o modelo

*MAT_HONEYCOMB. A utilização deste modelo prende-se com o facto de ser dedicado a materiais do tipo *honeycomb* e materiais celulares em geral, com comportamento anisotrópico. Este modelo considera que o coeficiente de Poisson do material é nulo. Os parâmetros que devem ser definidos são (tabela 4.3) a densidade (ρ) e o módulo de elasticidade (E) do material celular. É também necessário definir o módulo de elasticidade (E), a tensão de cedência (σ_y) e o coeficiente de Poisson (μ) do material compacto (denso). Para este modelo, o módulo de elasticidade varia desde o seu valor inicial até ao valor do material totalmente compactado. Considera-se que esta variação é linear com o volume relativo. O último parâmetro a definir é a deformação máxima que o material celular pode sofrer antes da rotura, em termos de modelo numérico, este valor indica a deformação à qual os elementos são eliminados do modelo.

Tabela 4.3: Propriedades dos materiais celulares utilizados nas simulações numéricas.

Propriedades Mecânicas		ρ	E	σ_y	μ	Deformação máxima
		[kg/m ³]	[GPa]	[MPa]		[%]
EA30SR2P/4P	Mat. Expandido	202 × 10 ³	0,431			78
	Mat. Denso		75	210	0,3	
EA30Ni2P/4P	Mat. Expandido	707 × 10 ³	0,082			61
	Mat. Denso		75	210	0,3	
EA10SR2P/4P	Mat. Expandido	180 × 10 ³	0,063			88
	Mat. Denso		75	210	0,3	
EA10Ni2P/4P	Mat. Expandido	309 × 10 ³	0,323			86
	Mat. Denso		75	210	0,3	

Finalmente, a curva de comportamento tensão-deformação do material celular deve ser adicionada ao modelo. Na figura 4.5 apresentam-se as curvas de todos os materiais celulares utilizados nas simulações.

Contactos e condições fronteira

É essencial e de extrema importância que se caracterize a forma como cada componente (projectil e alvo) envolvido na simulação interage quando em contacto com os restantes. Para tal, existem diversos modelos de contacto disponíveis na biblioteca do programa LS-DynaTM. Em todas as simulações realizadas, o contacto definido entre o alvo e o projectil é do tipo *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE muito usado em simulações de impactos balísticos. De uma forma geral, este contacto é recomendado sempre que elementos sólidos, envolvidos na definição do contacto, estão

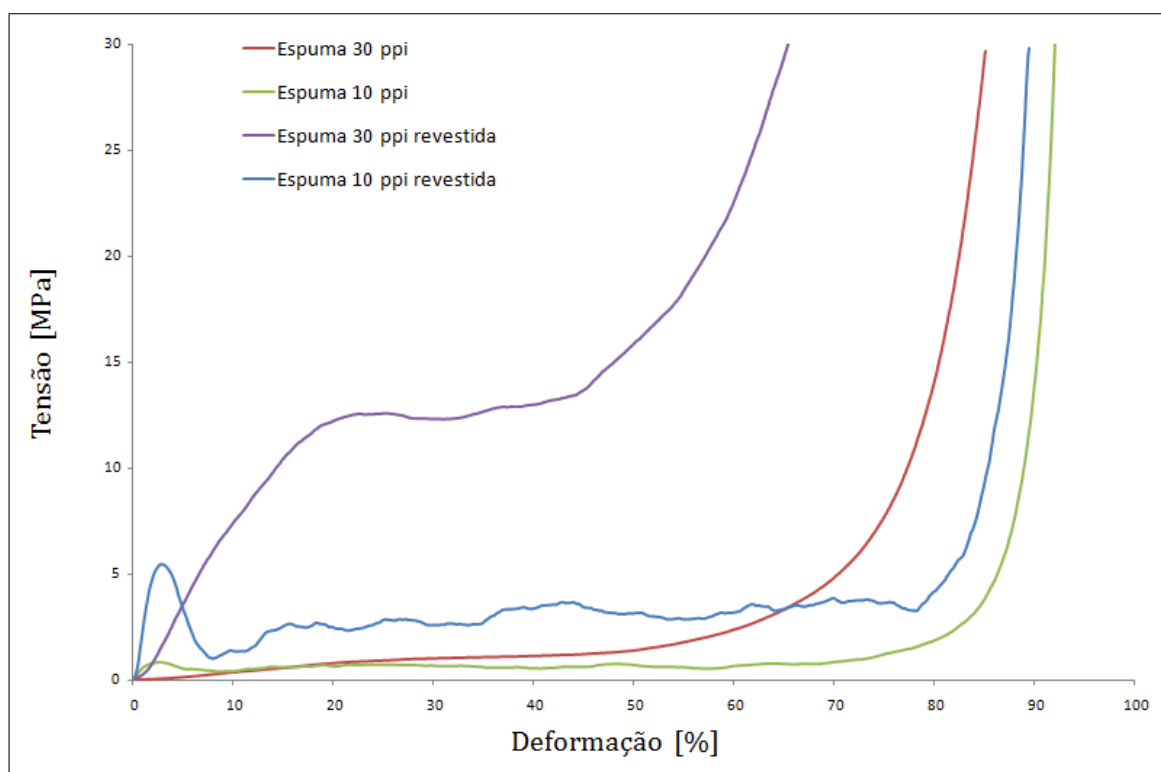


Figura 4.5: Representação das curva de tensão-deformação das espumas de 10 ppi, 30 ppi, sem revestimento e 10 ppi, 30 ppi com revestimento.

sujeitos a um processo virtual de erosão (eliminação de material) devido a critérios de ruptura do material (consultar tabela 4.3). Para a caracterização deste tipo de contacto é necessária a escolha de superfícies *slave* e *master*. Esta escolha é realizada segundo a maior deformação do material, sendo escolhido usualmente o *slave* para a estrutura que sofre mais deformações. De forma a tornar o sistema numericamente estável e ainda simular o sistema de apoio usado nos ensaios experimentais, fixam-se os nós das faces superior e inferior do alvo restringindo-se, portanto, todos os graus de liberdade destes nós, evitando assim a possibilidade quer de rotação quer de translação (figura 4.6).

Optimização da malha de elementos finitos

Para maximizar o grau de confiança nos resultados numéricos obtidos procede-se à optimização das condições de ensaio.

No que diz respeito à caracterização do comportamento dos materiais, e uma vez que o modelo geométrico é simples, o processo consiste unicamente na optimização da malha de elementos finitos, isto é, da dimensão característica dos elementos finitos. Com este procedimento pretende-se seleccionar, de entre malhas gradualmente refinadas, aquela que permite obter resultados mais precisos, sem que seja necessário recorrer a tempos de processamento computacional excessivos. Pretende-se assim seleccionar uma malha

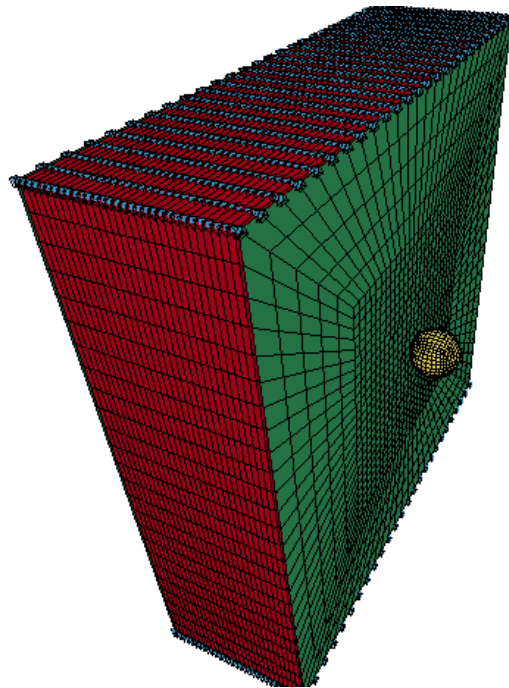


Figura 4.6: Representação do nós fixos na estrutura (evidenciados a azul).

refinada, isto é, cujos elementos possuam dimensões reduzidas, mas não em demasia, já que tal resultaria quer num processo de computação moroso e, conseqüentemente, dispendioso quer em erros de cálculo significativos, dada a maior quantidade de cálculos necessários à resolução do problema. Para este efeito, realizaram-se simulações numéricas com o modelo EA30SR2P, descrito na Secção 4.1.2. A dimensão dos elementos finitos utilizada é a que se indica na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Referências e características dos ensaios realizados para optimização da malha de elementos finitos.

Tamanho do elemento [mm]	Número de elementos	Tempo de simulação [min]
10	11000	15
5	16600	17
3,3	23800	18
2,5	32600	21
2	43000	27
1,5	62968	51

Para análise dos resultados obtidos, utilizaram-se como referência os valores da tensão de von Mises máxima, num ponto comum a todos os ensaios. O objectivo é comparar os valores obtidos em cada simulação e averiguar a convergência destes consoante o refinamento da malha.

Pode observar-se através da análise dos valores do gráfico da figura 4.7 que, para as vari-

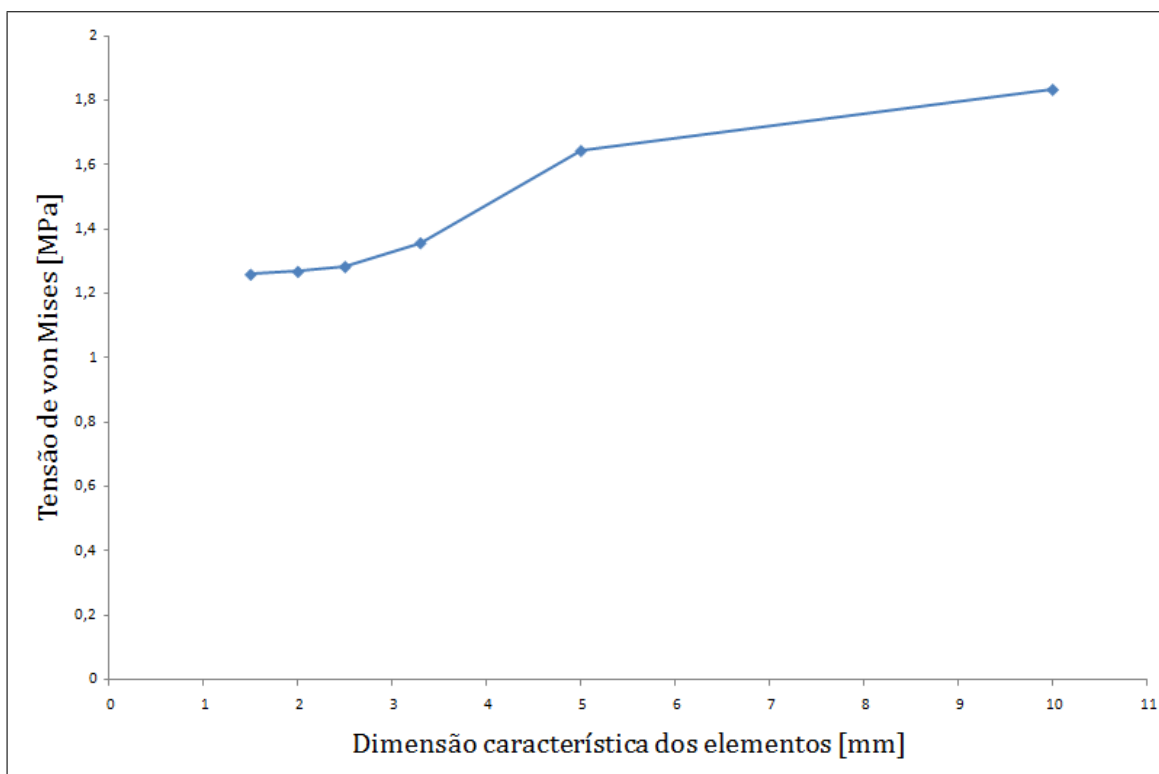


Figura 4.7: Dispersão dos valores da tensão máxima de von Mises para diferentes dimensões dos elementos.

adas simulações, os valores de tensão máxima de von Mises convergem razoavelmente a partir da malha de elementos finitos com dimensão característica $l = 2,5$ mm. Consequentemente, a malha de elementos finitos escolhida para realizar todos os restantes ensaios numéricos é a malha com $l = 2$ mm, já que permite resultados com elevada confiança não aumentando consideravelmente o tempo de processamento das simulações numéricas. As malhas de elementos finitos usadas estão representadas na figura 4.8.

4.2 Testes com projecteis FSP

A fragmentação é o processo pelo qual, por exemplo, o invólucro de bombas, de granadas, de granadas de artilharia, *etc.*, é quebrado pela explosão do detonante interno. A terminologia técnica para estas peças são fragmentos, embora lascas ou estilhaços possam ser utilizados para fragmentos sem forma definida. Os fragmentos também podem ser pré-formados com várias formas (esferas, cubos, cilindros, *etc.*) e tamanhos. Os fragmentos pré-formados encontram-se colocados dentro de uma matriz até que exista detonação. A alta velocidade resultante da projecção dos fragmentos é o principal mecanismo de letalidade deste tipo de armas.

Os testes até agora definidos utilizam projecteis esféricos. Estes enquadram-se tam-

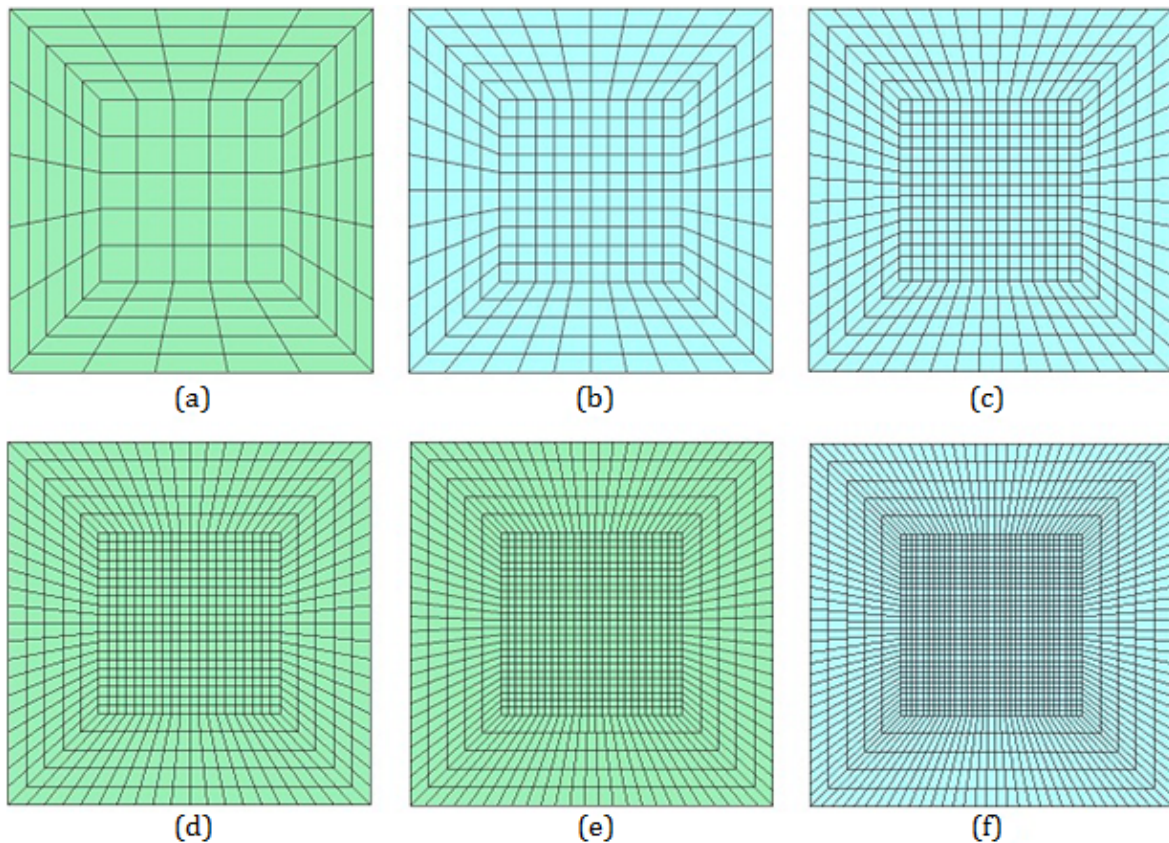


Figura 4.8: Vista frontal das malhas de elementos finitos testadas na fase de optimização de malha: (a) $l = 10$ mm, (b) $l = 54$ mm, (c) $l = 3,3$ mm, (d) $l = 2,5$ mm, (e) $l = 2$ mm, (f) $l = 1,5$ mm.

bém na categoria dos fragmentos de explosão. Porém, de modo a estandardizar os efeitos de impacto dos estilhaços, foram criadas várias normas para produção destes projecteis. Os FSP (*fragment simulating projectiles*) são definidos de acordo com estas normas. A norma MIL-DTL-46593B [A.R.L. 06] é a actualmente utilizada pelas forças armadas Norte Americanas para produção destes projecteis de teste. Os testes realizados com FSP normalmente incidem em verificar o comportamento de materiais em coletes de protecção [Wambua 07], metais ou cerâmicos podem ser utilizados em coletes leves, fornecendo protecção adicional contra disparos [Iremonger 96] e os componentes metálicos ou camadas de fibras podem dar resistência contra ataques de facas e armas semelhantes. Os coletes mais leves são utilizados por forças policiais, particulares, forças de seguranças e guarda-costas, enquanto que os coletes reforçados são principalmente utilizados por soldados em combate, unidades tácticas policiais e equipas de resgate de reféns.

Porém, nesta secção do trabalho estudam-se os efeitos de disparos de diferentes calibres de FSP e os respectivos impactos nas estruturas *sandwich*, mais especificamente, no alvo EA30Ni4P, com quatro placas de blindagem e núcleo em espuma metálica

revestida com níquel. A escolha deste alvo recai no facto de ser o que apresentou nos testes experimentais o melhor desempenho em termos de impacto balístico. Com estas simulações pretende-se averiguar qual a velocidade e respectiva energia cinética necessária para que os fragmentos perfurem este alvo.

4.2.1 Procedimentos

Os testes realizados consistiram em validar disparos com fragmentos de calibres 0,22"; 0,33"; 0,50" e 20 mm. A norma Norte Americana (MIL-DTL-46593B) especifica as dimensões, massa e material utilizado na construção destes projecteis. Estas características apresentam-se na tabela 4.5. Nas imagens 4.9 a 4.12 ilustram-se os desenhos de definição e dimensões dos projecteis FSP utilizados.

Tabela 4.5: Características dos fragmentos simulados (FSP) segundo a norma MIL-DTL-46593B.

Calibre	Diâmetro [mm]	Comprimento de referência [mm]	Massa [g]
0,22	5,5	6,4	1,1
0,33	7,4	8,6	2,8
0,50	12,6	14,7	13,4
20 mm	19,9	22,8	53,7

4.2.2 Modelação em LS-Dyna™

Ao modelo numérico EA30Ni4P foi substituído o projectil esférico por cada um dos fragmentos de teste. A malha de elementos finitos escolhida é composta por elementos sólidos tetraédricos com três nós e três graus de liberdade.

O modelo de material escolhido para simular o comportamento dos fragmentos foi o *MAT_RIGID. Este modelo define que o material não se deforma e requer propriedades como a densidade (ρ), o módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (μ). Na tabela 4.6 apresentam-se as propriedades referidas acima.

Seguindo o procedimento utilizado nas simulações com o projectil esférico, em todas as simulações realizadas, o contacto definido entre o alvo e o projectil FSP é do tipo, *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE. A forma a tornar o sistema numericamente estável é idêntica à anteriormente utilizada, fixam-se os nós das faces superior e inferior do alvo restringindo-se, portanto, todos os graus de liberdade destes nós, evitando assim a possibilidade quer de rotação quer de translação (ver figura 4.6).

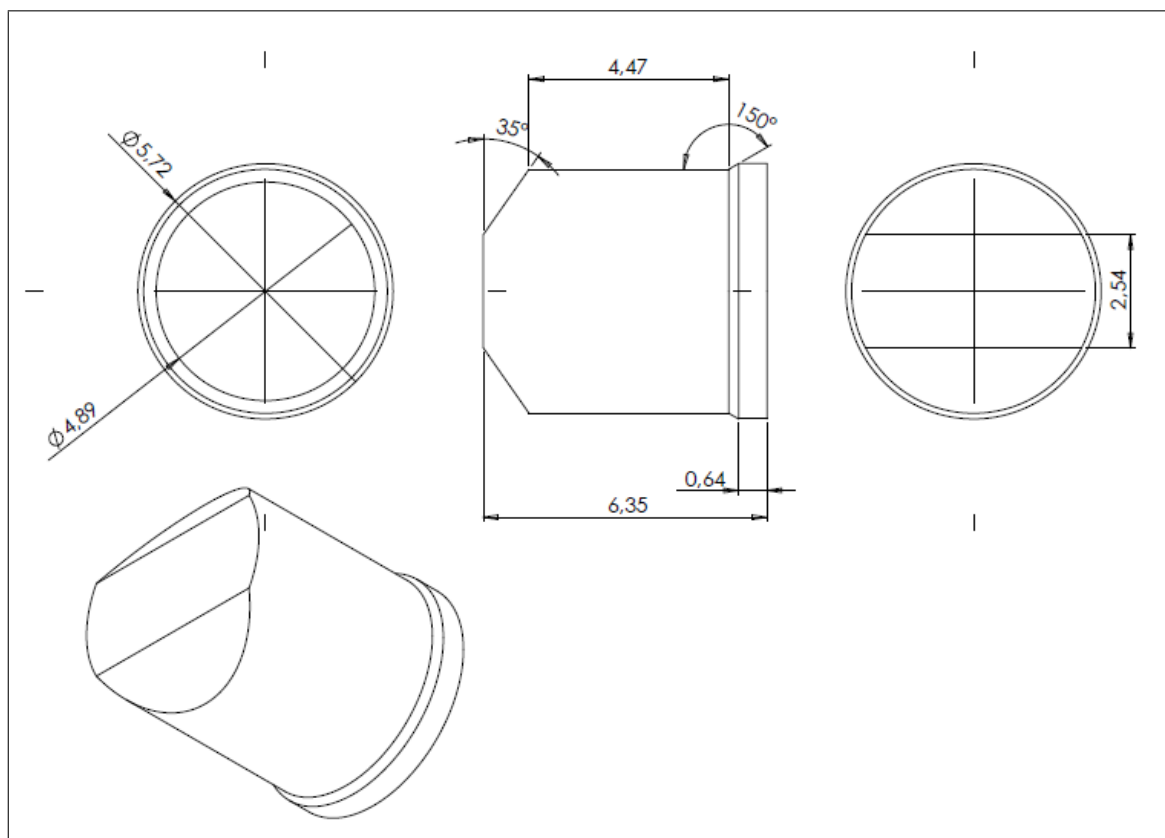


Figura 4.9: Desenho de definição do projectil FSP de calibre 0,22".

Tabela 4.6: Propriedades mecânicas do material utilizado nos projecteis FSP.

Propriedades Mecânicas	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	μ
Aço 4337H	7940	205	0,29

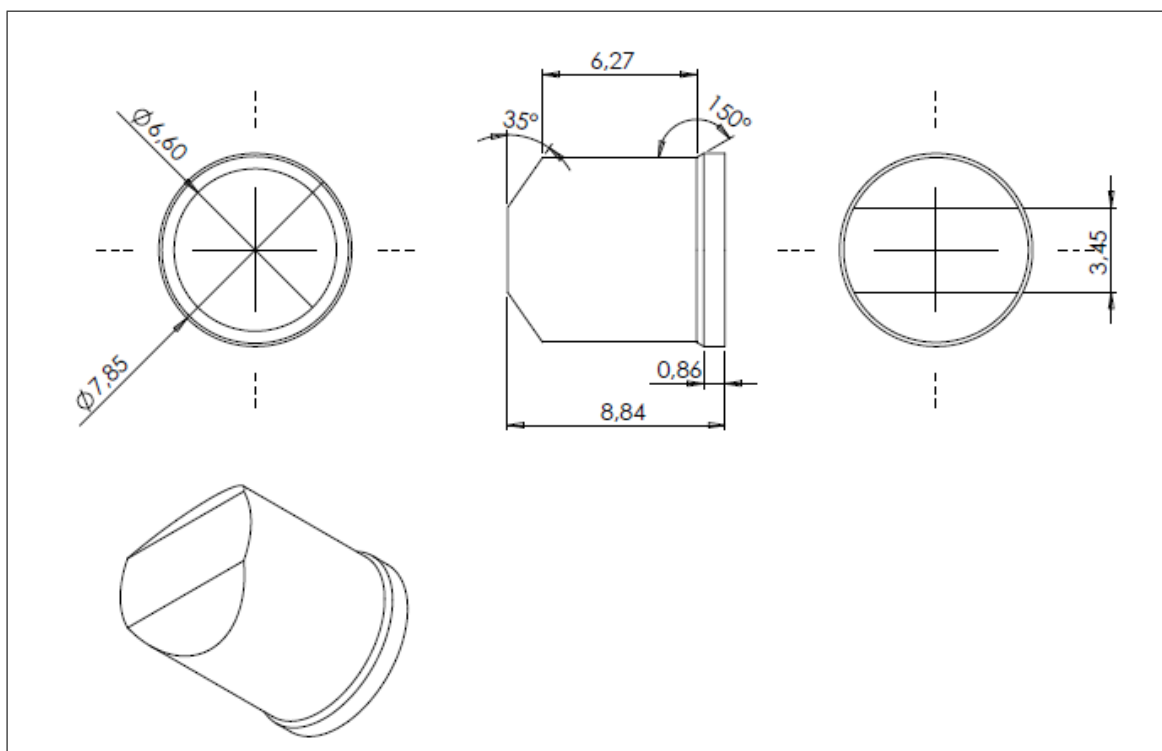


Figura 4.10: Desenho de definição do projectil FSP de calibre 0,30".

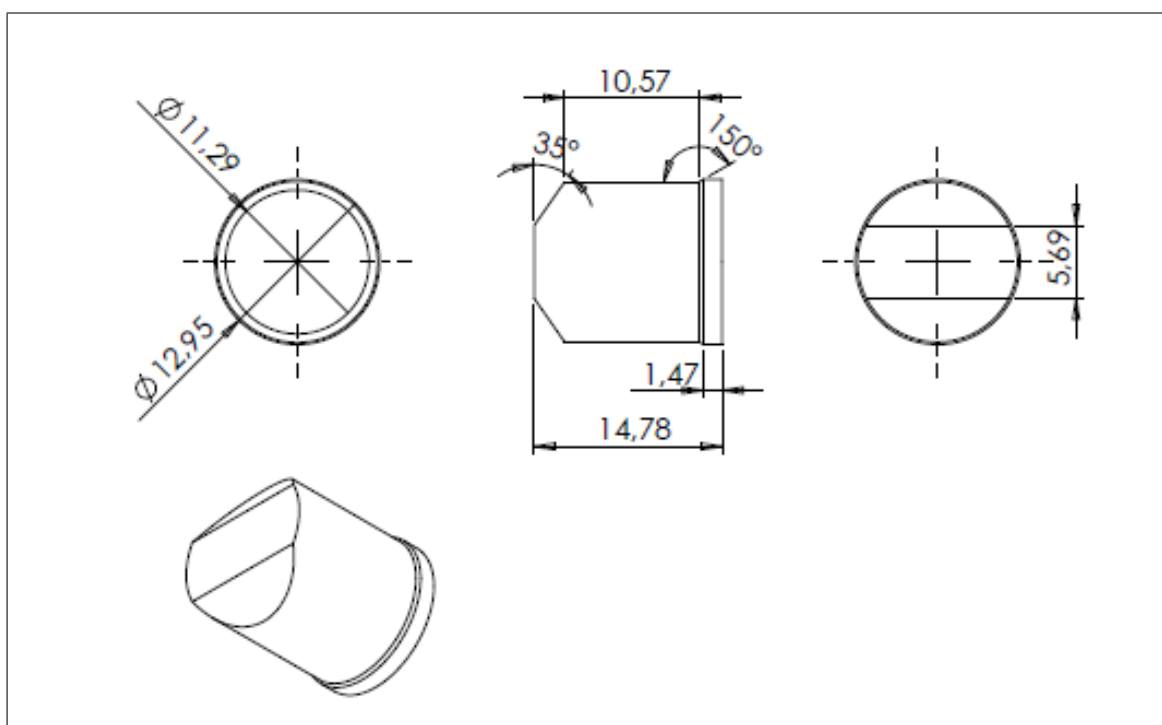


Figura 4.11: Desenho de definição do projectil FSP de calibre 0,50".

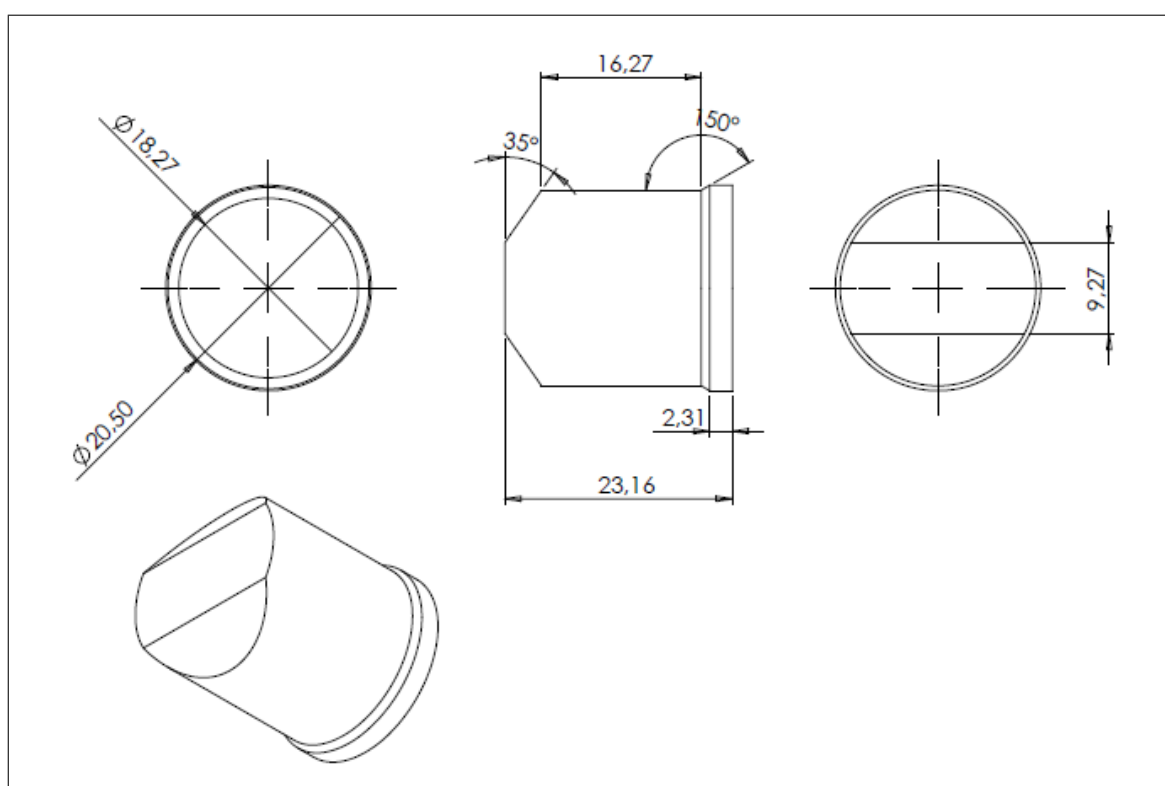


Figura 4.12: Desenho de definição do projectil FSP de 20 mm.

Parte III

Apresentação e discussão de resultados

Capítulo 5

Análise experimental e numérica

Na secção seguinte apresentam-se detalhadamente os perfis de velocidades dos modelos simulados e respectivas comparações com os resultados obtidos experimentalmente (ver figura 5.1). Estudam-se os efeitos da porosidade e revestimento das espumas na absorção de energia da estrutura, bem como a influência do número de placas de blindagem no modo de dissipação dessa energia. Devido a existirem vários factores que influenciam a velocidade residual do projectil, os perfis de velocidades serão apresentados separadamente, de acordo com o alvo utilizado, posteriormente, comparam-se todos os resultados numéricos obtidos em termos energéticos.

A evolução da velocidade do projectil para o ensaio com referência EA10SR2P pode ser observada na figura 5.2. Após análise do gráfico, verifica-se que durante a penetração do alvo existe uma redução na velocidade de $\Delta v = 55$ m/s, sendo assim a velocidade final do projectil de aproximadamente $v_{res} = 245$ m/s. Quando comparado com o resultado obtido experimentalmente, verifica-se um erro relativo $e = 4.3\%$.

A velocidade final atinge-se após $\Delta t = 0,055$ s do impacto do projectil no alvo. Quanto ao modo como o projectil perde velocidade, é de realçar o intervalo de tempo entre 0,03 e 0,04 s onde o declive da curva é aproximadamente zero, significando que a desaceleração é nula. Este fenómeno deve-se ao facto de ser nesta altura que o projectil atravessa o material que oferece mais resistência à passagem, as placas de blindagem de alumínio.

No gráfico da figura 5.3 pode observar-se o perfil de velocidade simulado numericamente para o modelo EA10SR4P. As três camadas de espuma e quatro placas de blindagem provocam um decréscimo na velocidade de $\Delta v = 110$ m/s no projectil, sendo a velocidade residual de cerca de $v_{res} = 190$ m/s.

Uma vez que se trata de uma estrutura com quatro placas de blindagem, observam-se mais oscilações na forma como o projectil perde velocidade, é de realçar o intervalo de tempo entre os 0,02 e 0,05 s onde a desaceleração atinge valores muito próximos de

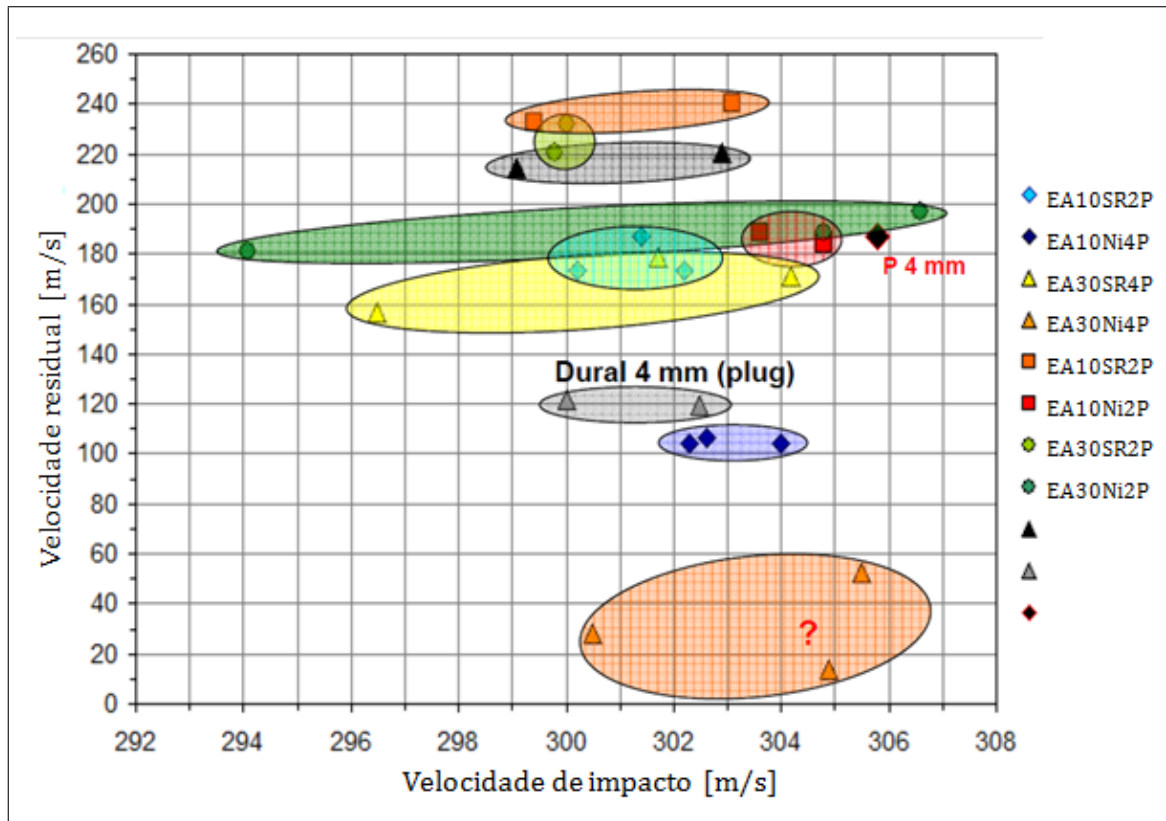


Figura 5.1: Velocidades residuais obtidas experimentalmente [Jung 09a]

zero. A velocidade final é atingida ao final de 0,2 s do início da simulação e neste caso o erro entre os resultados numéricos e os experimentais situa-se em $e = 4,3\%$.

O modelo numérico do alvo para qual se apresenta a evolução da velocidade representado na figura 5.4 é o designado por EA10Ni2P. Nesta simulação os resultados numéricos mostram-se coincidentes com os experimentais sendo o erro associado de $e = 2,7\%$. A velocidade residual do projétil é atingida após $t = 0,07$ s do impacto e é $v_{res} = 180$ m/s, o que representa uma redução de velocidade de $\Delta v = 120$ m/s. É de notar que a desaceleração nesta simulação de impacto é constante ao longo de todo o tempo de penetração do projétil excepto no intervalo de tempo entre $t = 0,03$ e $t = 0,04$ s onde se verifica uma redução menos acentuada da velocidade.

A velocidade do projétil simulada para este alvo pode ser observada na figura 5.5. Após análise dos resultados, verifica-se uma desaceleração ($\Delta v = 195$ m/s), permitindo esta que o projétil atinja uma velocidade à saída do alvo de $v_{res} = 105$ m/s. Este resultado obtido numericamente apresenta um erro $e = 2,7\%$ em relação às medições experimentais.

A velocidade do projétil decresce mais lentamente nos intervalos de tempo em que o projétil atravessa as placas de blindagem interiores, nomeadamente entre $t = 0,03$ e $t = 0,05$ s, e posteriormente $t = 0,06$ e $t = 0,07$ s. A velocidade final é atingida ao

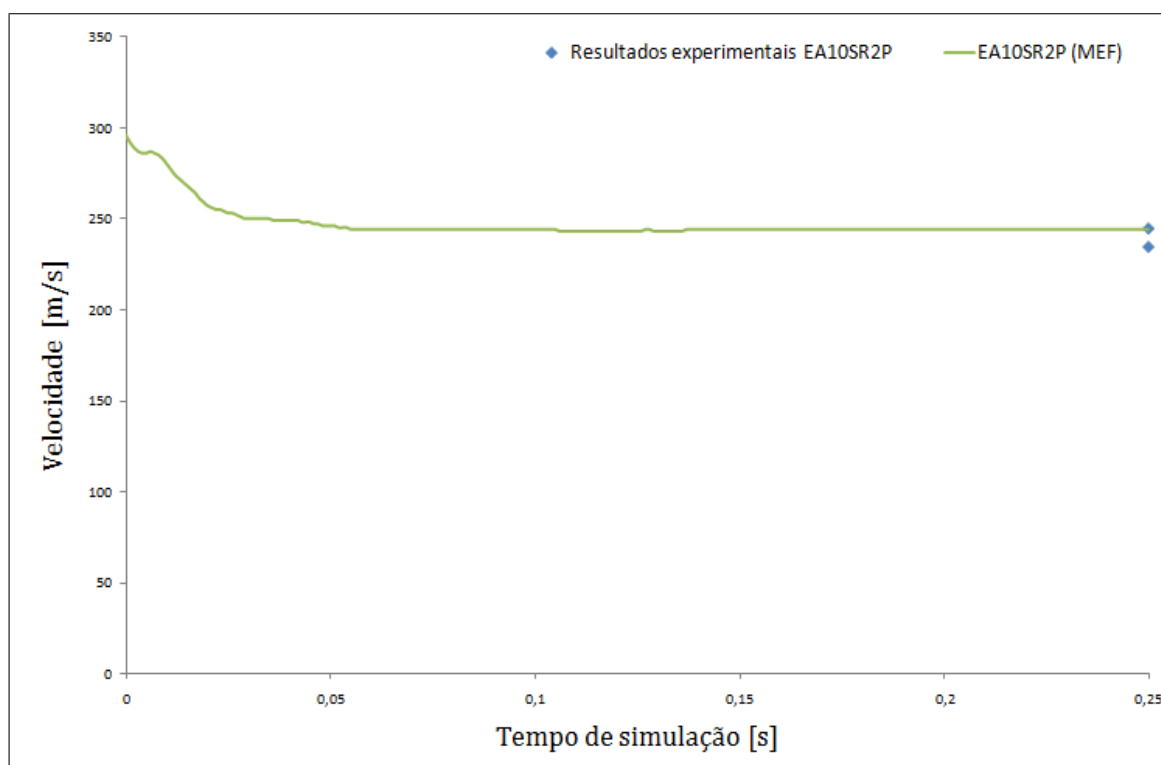


Figura 5.2: Perfil da velocidade do projétil na simulação com duas placas de blindagem e espuma de alumínio de 10 ppi sem revestimento (referenciado como EA10SR2P).

final de $t = 0,20$ s após o impacto inicial.

No gráfico da figura 5.6 pode ver-se o perfil de velocidade que resulta da simulação numérica com o modelo EA30SR2P. O núcleo de 30 mm de espuma e duas placas de blindagem provocam uma redução na velocidade de $\Delta v = 72$ m/s do projétil, sendo a velocidade residual $v_{res} = 228$ m/s. Esta velocidade é atingida ao final de $t = 0,6$ s. O erro entre os resultados numéricos e os experimentais neste caso, é aproximadamente $e = 1,3\%$.

A evolução da velocidade do projétil para este ensaio pode ser observada na figura 5.7. Após análise do gráfico, verifica-se uma diferença na velocidade de $\Delta v = 135$ m/s atingindo assim o projétil uma velocidade à saída do alvo de $v_{res} = 165$ m/s. Este valor apresenta um erro $e = 2,7\%$ relativamente às medições experimentais. A velocidade final é atingida ao final de $t = 0,10$ s de simulação e observam-se nos intervalos de tempo $t = 0,04$ a $t = 0,06$ s e $t = 0,07$ a $t = 0,09$ s reduções drásticas na desaceleração do projétil.

O alvo com espuma de 30 ppi e duas placas de blindagem (EA30Ni2P) apresenta resultados que se enquadram perfeitamente com os experimentais. A figura 5.8 mostra a velocidade do projétil durante o impacto no alvo. A velocidade de saída, $v_{res} = 185$ m/s apresenta um erro $e = 2,7\%$ em relação às velocidades medidas experimentalmente e

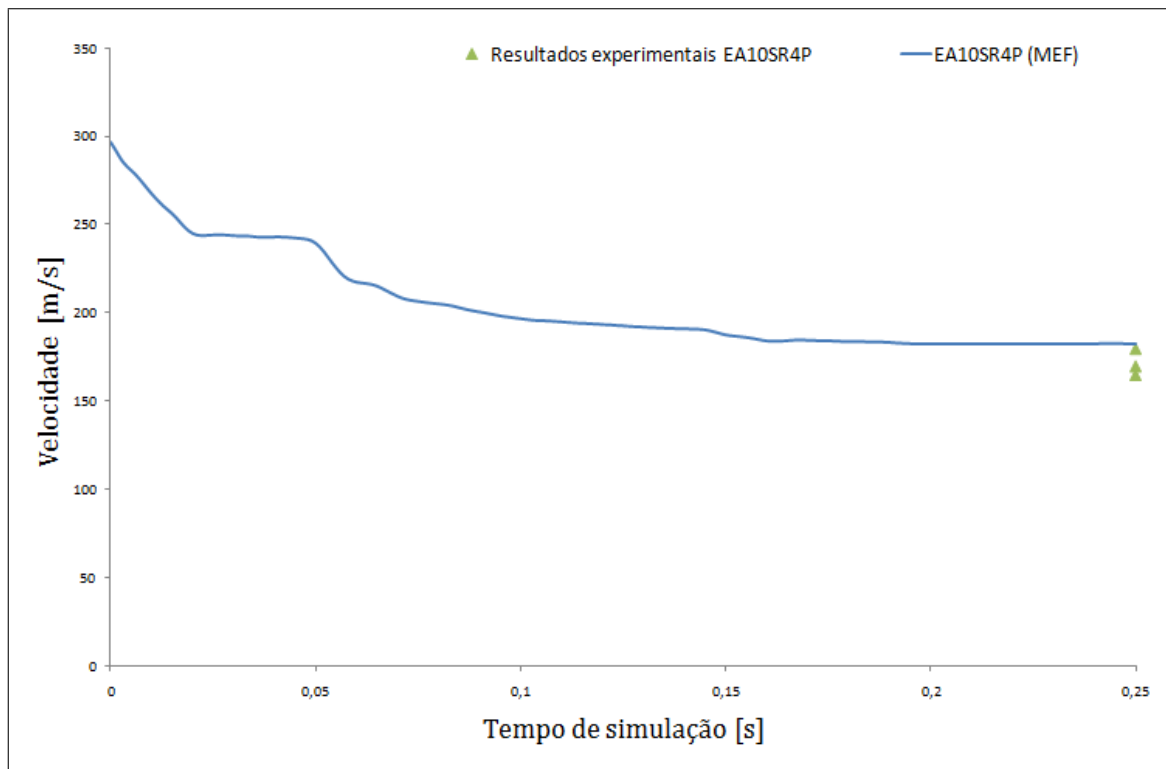


Figura 5.3: Perfil da velocidade do projétil na simulação de quatro placas de blindagem e espuma de alumínio de 10 ppi sem revestimento (referenciado como EA10SR4P).

é atingida aos $t = 0,65$ s após o impacto com o alvo. Não é perceptível o impacto na segunda placa de blindagem neste perfil de velocidade. A razão deste facto deve-se à maior capacidade de deformação da espuma revestida. A espuma à medida que se deforma vai exercendo pressão na placa de blindagem uniformizando a desaceleração durante todo o tempo que o projétil atravessa o alvo.

O modelo numérico para qual se apresenta a evolução da velocidade representada na figura 5.9 é o modelo EA30Ni4P. Esta é de todas as simulações realizadas a que apresenta maior discrepância entre os resultados numéricos e experimentais: aproximadamente 12,5%. Como referido anteriormente, esta diferença deve-se à grande dispersão nos valores de velocidade obtidos experimentalmente. Numericamente, a velocidade de saída do projétil é $v_{res} = 45$ m/s e é atingida após $t = 0,22$ s do impacto no alvo. A variação de velocidade neste caso é a maior registada, aproximadamente $\Delta v = 255$ m/s. Na tabela 5.1 podem observar-se as velocidades residuais obtidas experimentalmente confrontadas com as obtidas numericamente. O intuito desta informação passa por resumir os resultados apresentados anteriormente e verificar a concordância entre os resultados experimentais e numéricos. Observa-se que o erro relativo é inferior a 5% em todos os ensaios realizados, excepto no ensaio EA30Ni4P em que o erro entre os resultados numéricos e experimentais aumenta para 12,5%. Este valor deve-se à enorme

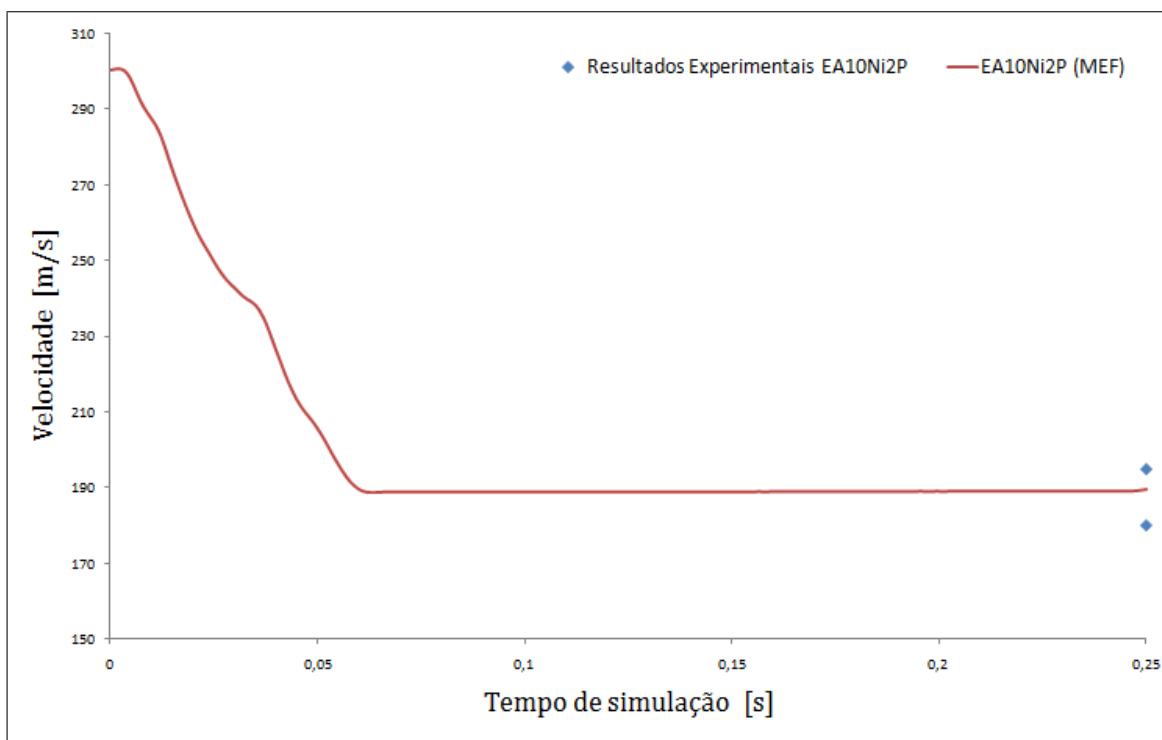


Figura 5.4: Perfil da velocidade do projectil na simulação de duas placas de blindagem e espuma de alumínio de 10 ppi revestida (referenciado como EA10Ni2P).

disparidade entre os valores de velocidade residual obtidos experimentalmente com este alvo. Ainda assim, verifica-se que os resultados numéricos encontram-se sempre próximos dos experimentais.

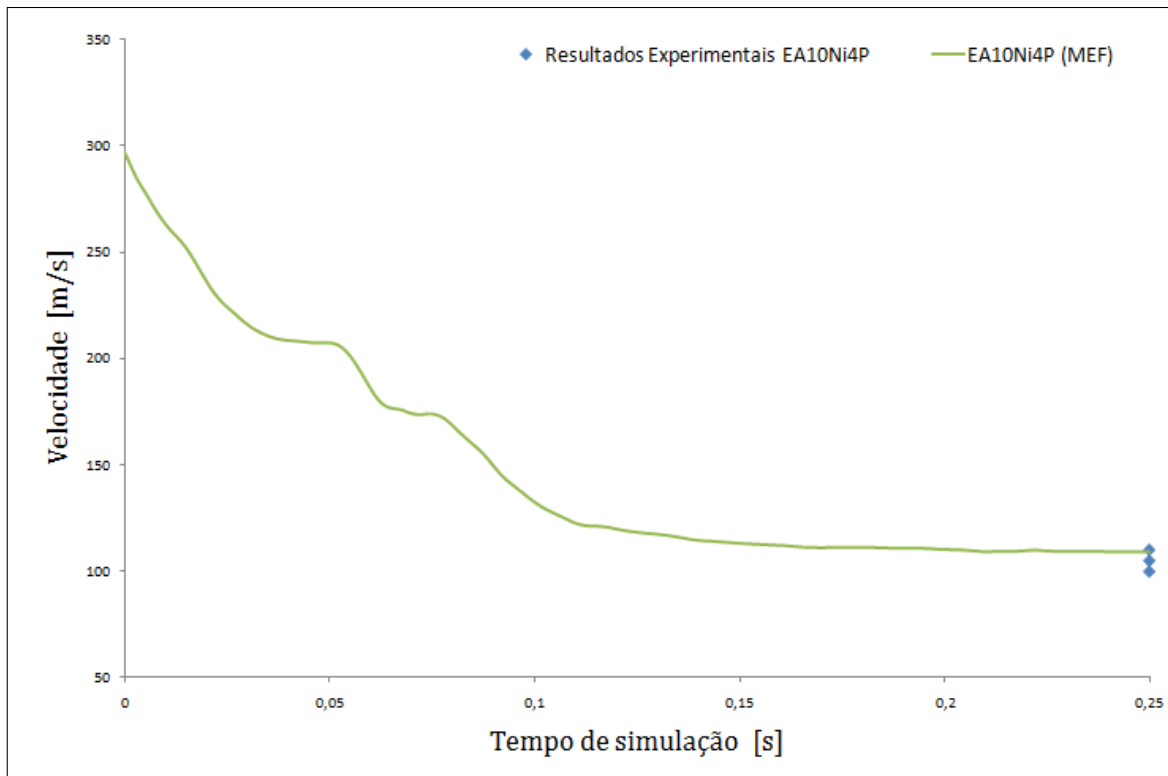


Figura 5.5: Perfil da velocidade do projétil na simulação de quatro placas de blindagem e espuma de alumínio de 10 ppi revestida (referenciado como EA10Ni4P).

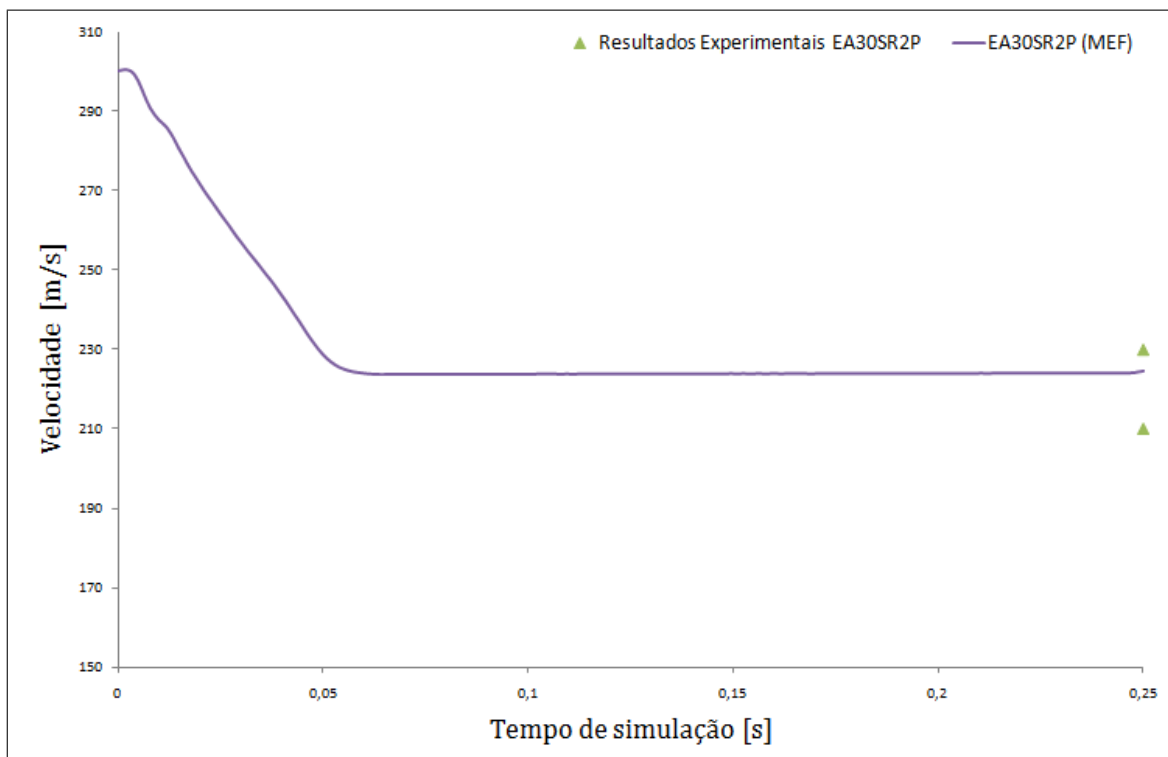


Figura 5.6: Perfil da velocidade do projétil na simulação de duas placas de blindagem e espuma de alumínio de 30 ppi sem revestimento (referenciado como EA30SR2P).

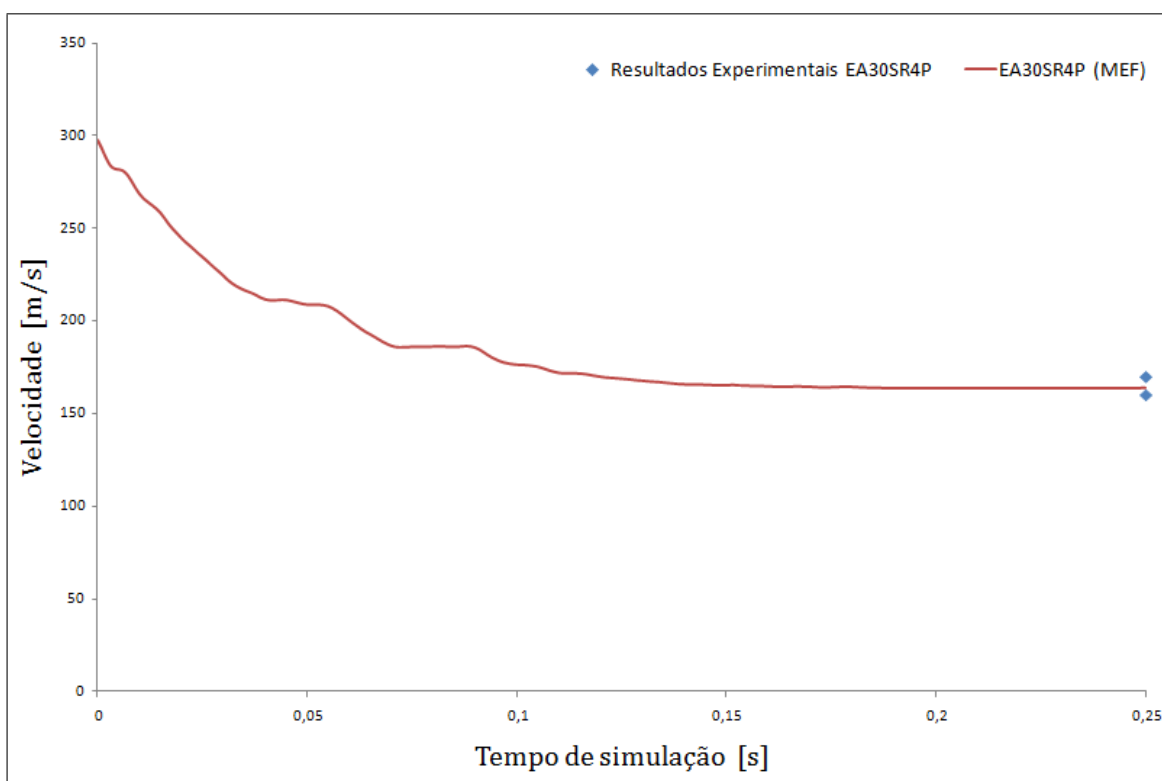


Figura 5.7: Perfil da velocidade do projétil na simulação de quatro placas de blindagem e espuma de alumínio de 30 ppi sem revestimento (referenciado como EA30SR4P).

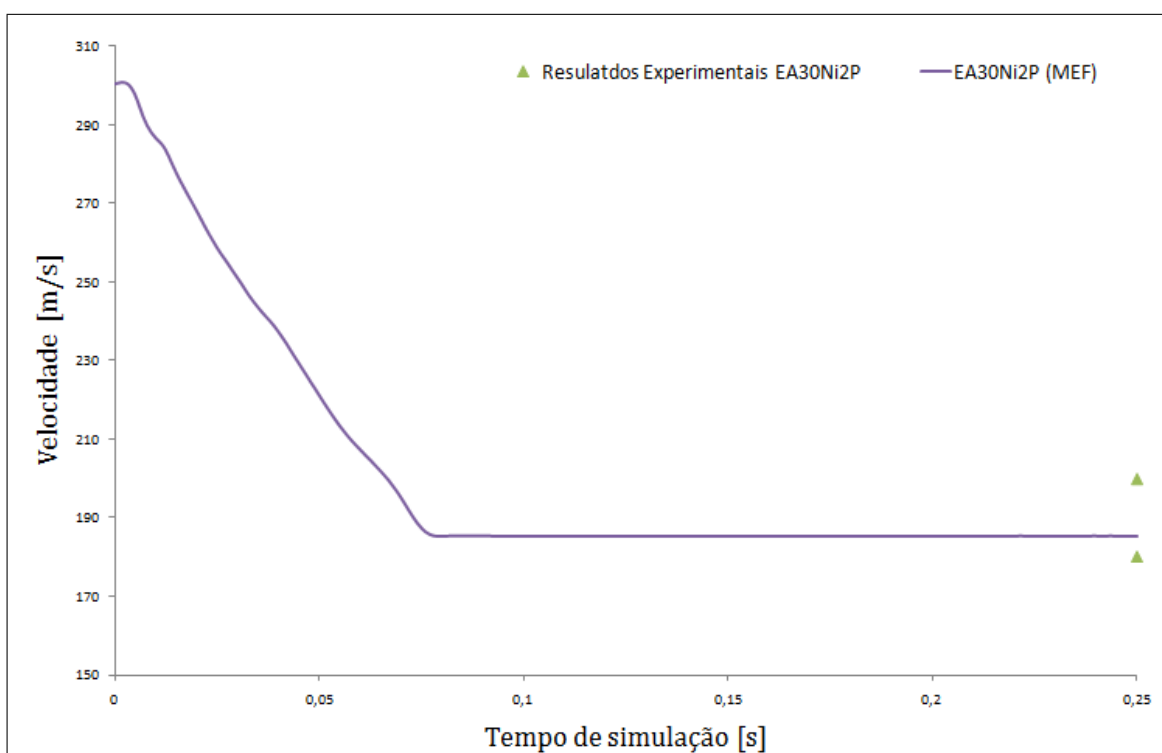


Figura 5.8: Perfil da velocidade do projétil na simulação de duas placas de blindagem e espuma de alumínio de 30 ppi revestida com níquel (referenciado como EA30Ni2P).

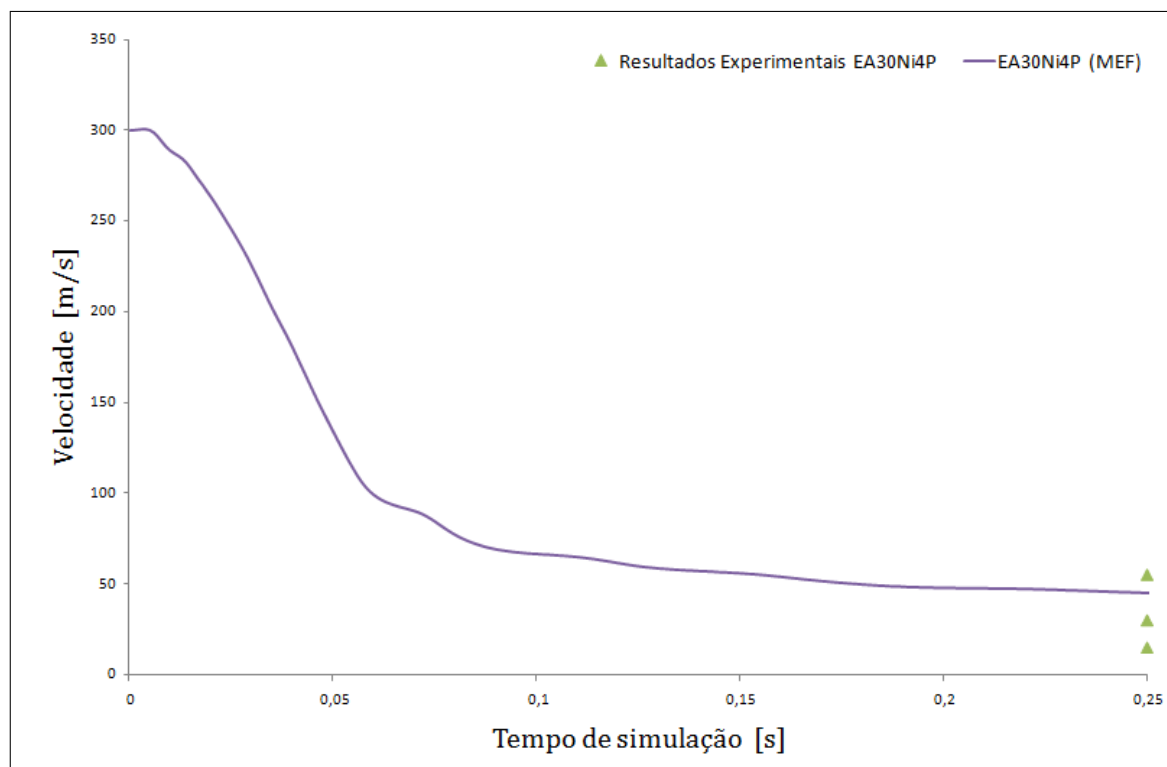


Figura 5.9: Perfil da velocidade do projectil na simulação de quatro placas de blindagem e espuma de alumínio de 30 ppi revestida com níquel (referenciado como EA30Ni4P).

Tabela 5.1: Velocidades residuais obtidas experimentalmente e através de simulação numérica.

Referência do alvo	Velocidade residual (MEF)	Velocidade residual (exp.)	Varição da velocidade	Erro relativo
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]
EA10SR2P	245	235	55	4,3
EA10SR4P	190	180	110	4,3
EA10Ni2P	180	185	120	2,7
EA10Ni4P	105	110	195	2,7
EA30SR2P	228	225	72	1,3
EA30SR4P	155	160	145	2,7
EA30Ni2P	185	190	115	2,7
EA30Ni4P	45	40	255	12,5

Capítulo 6

Desempenho das estruturas estudadas

A energia absorvida pelas estruturas *sandwich* é proporcional à variação da velocidade do projectil, pois quanto mais baixa for a velocidade residual do projectil, maior será a sua perda de energia e consequentemente, maior será a energia que a estrutura absorve. No gráfico da figura 6.1 pode observar-se a evolução da energia cinética do projectil ao longo do tempo em todos os ensaios numéricos realizados. Na tabela 6.1 pode verificar-se a variação de energia cinética do projectil durante o impacto e a respectiva capacidade de absorção de energia dos alvos.

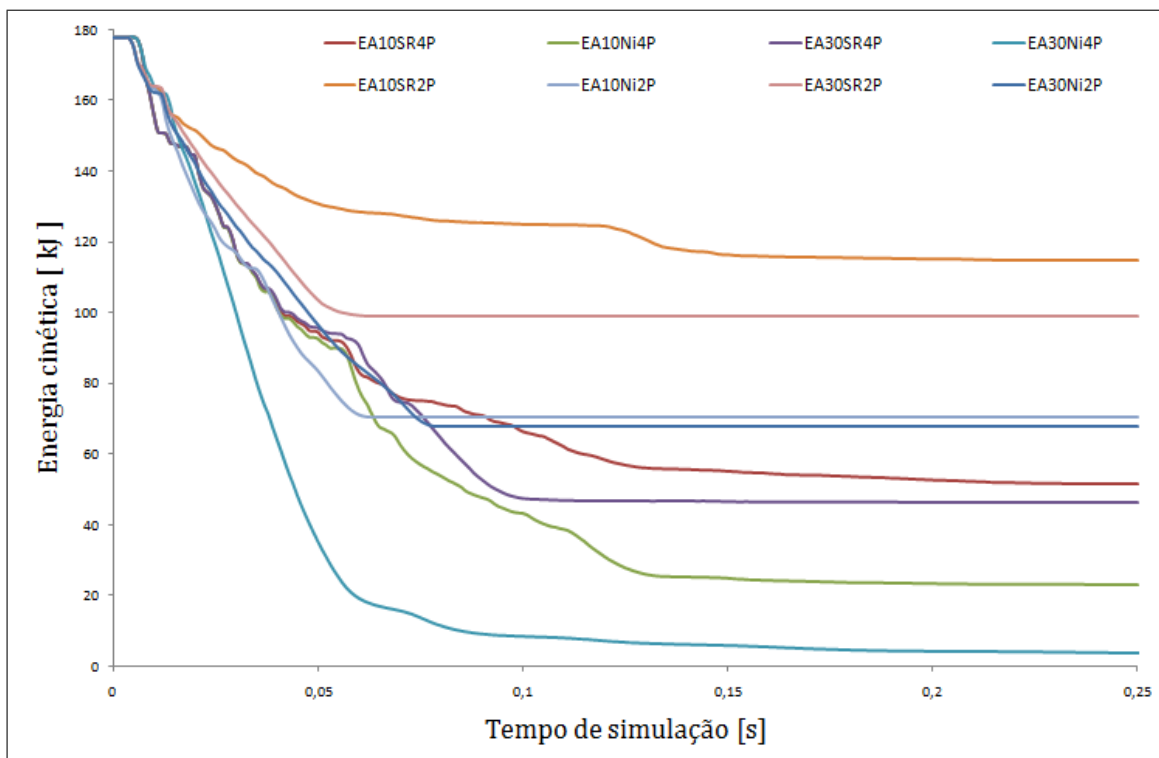


Figura 6.1: Evolução da energia cinética do projectil ao longo do tempo, para todos os ensaios realizados.

Tabela 6.1: Variação da energia cinética do projectil e absorção de energia do alvo.

Ensaio numérico	Variação energia cinética [kJ]	Energia absorvida [%]
EA10SR2P	62,9	35,46
EA10SR4P	126,1	70,97
EA30SR2P	78,8	44,37
EA30SR4P	131,5	74,04
EA10Ni2P	107,3	60,39
EA10Ni4P	154,5	86,95
EA30Ni2P	109,8	61,84
EA30Ni4P	173,6	97,72

No gráfico da figura 6.2 comparam-se os valores relativos à capacidade de absorção de energia segundo os factores que influenciam o desempenho dos alvos, nomeadamente, a densidade da espuma, o revestimento e o número de placas de blindagem.

Focando a densidade da espuma como factor de influência na capacidade de absorção de energia, verificam-se melhorias em todos os alvos quando se substitui o núcleo de espuma de 10 ppi por um de espuma de 30 ppi. Porém, é mais vantajoso aumentar a densidade da espuma em certas situações, tais como, por exemplo, nos alvos com duas placas de blindagem com espuma de alumínio sem revestimento. O aumento da densidade neste caso melhora em cerca de 9% a energia absorvida. Por outro lado, se nos mesmos alvos a espuma possuir um revestimento de níquel, o aumento da densidade apenas influencia em cerca de 2% a capacidade de absorção de energia. Quando se tratam de alvos com quatro placas de blindagem, verifica-se o efeito contrário, isto é, aumentando a densidade das espumas sem revestimento observam-se aumentos de aproximadamente 3% na energia absorvida, enquanto que se as espumas forem revestidas com níquel, a variação da densidade influencia a energia absorvida em 10%. Estes dados levam a concluir que o aumento da densidade da espuma é mais vantajoso se for utilizada espuma sem revestimento em estruturas *sandwich* com duas placas e se for utilizada espuma revestida em estruturas *sandwich* com quatro placas de alumínio.

Observando a influência da aplicação de um revestimento de níquel com $50\mu m$, observam-se várias diferenças. Nas simulações com as estruturas *sandwich* com duas placas de alumínio, o uso de espumas revestidas aumenta a capacidade de absorção de energia em cerca de 25% para as espumas de 10 ppi e 18% para as espumas de 30 ppi. Quando observamos as simulações com três camadas de espuma, as melhorias são menos significativas. Registam-se aumentos de 16% quando se utiliza a espuma de 10 ppi e de 10% para a espuma de 30 ppi. Estes resultados são espectáveis, pois nos alvos de duas placas de blindagem a camada de espuma tem um papel mais determinante na resistência à passagem do projectil.

O terceiro parâmetro que altera consideravelmente o comportamento dos alvos durante o impacto é o número de placas de blindagem. Verifica-se que este é o parâmetro que mais influencia a absorção de energia dos alvos. Nos ensaios com espumas de 10 ppi sem revestimento e 30 ppi com e sem revestimento verificam-se aumentos de absorção de energia idênticos, na ordem dos 35%. Os únicos alvos em que este aumento difere é nos que usam espuma de alumínio de 10 ppi com revestimento.

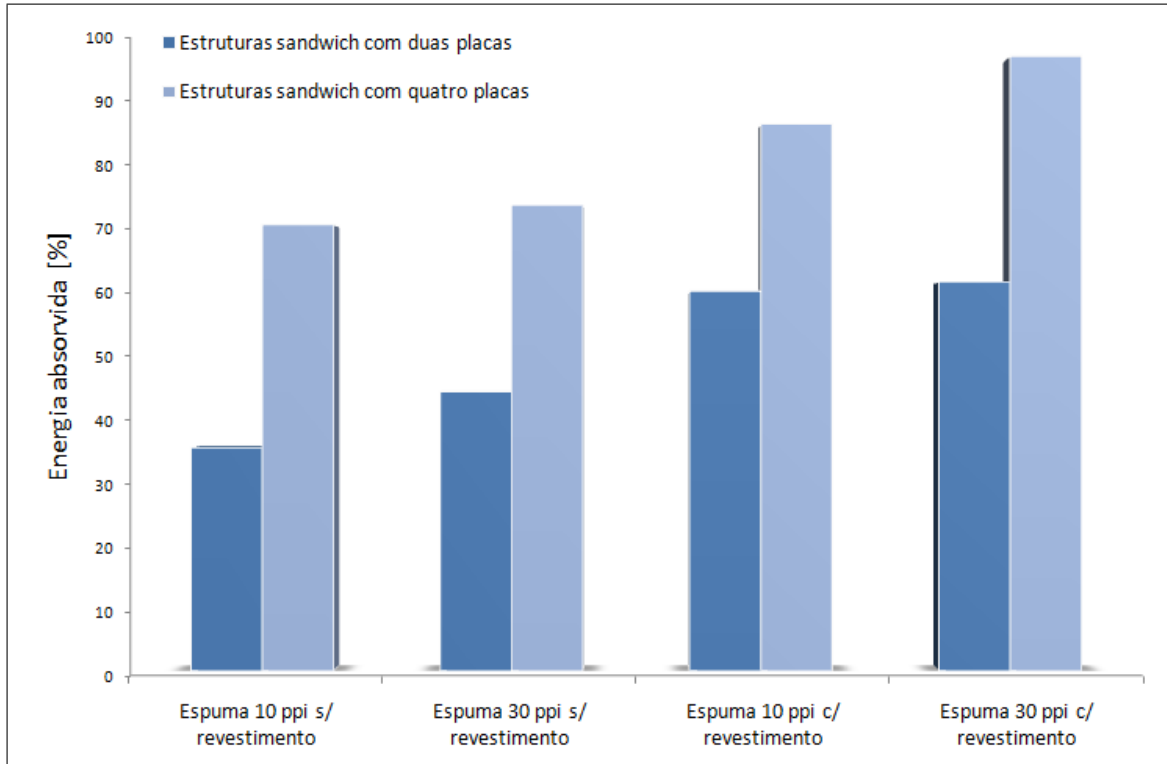


Figura 6.2: Energia absorvida pelos alvos simulados numericamente.

Os resultados apresentados são acompanhados pela figura 6.3 que demonstra a deformação e consequente erosão da malha de elementos finitos $t = 0,25$ s após o impacto do projectil no alvo. Observando a imagem, verifica-se que nenhum dos alvos é destruído totalmente embora se verifique penetração total para todos os ensaios realizados. As imagens (a) a (d) da figura 6.3 representam os modelos numéricos EA10SR2P, EA30SR2P, EA10Ni2P e EA30Ni2P respectivamente. Todos estes modelos numéricos possuem duas placas de alumínio e núcleo com 30 mm de espessura. Após análise das imagens, observa-se que a deformação da malha de elementos finitos é idêntica para todos estes alvos, existindo projecção de material na sequência da passagem do projectil. Também pode observar-se que vários elementos finitos das placas de alumínio desaparecem do modelo, isto deve-se ao critérios de falha do material, definidos na secção 4.1.2.

Nas imagens (e) a (h) da figura 6.3, encontram-se representados os alvos com qua-

tro placas de alumínio, referenciados respectivamente como EA10SR4P, EA30SR4P, EA10Ni4P e EA30Ni4P. Nestes casos a deformação da malha de elementos finitos mostra que este tipo de estrutura *sandwich* têm maior capacidade de protecção que as suas homólogas de duas placas, pois para o mesmo instante ($t = 0,25$ s) verifica-se que o projectil ainda se encontra a abandonar os alvos ainda que a velocidade residual já tenha sido atingida. A projecção de material também acontece e observa-se que a última placa de alumínio sofre deformação considerável devido à pressão realizada pelos núcleos de espuma e placas interiores aquando da perfuração, pelo projectil.

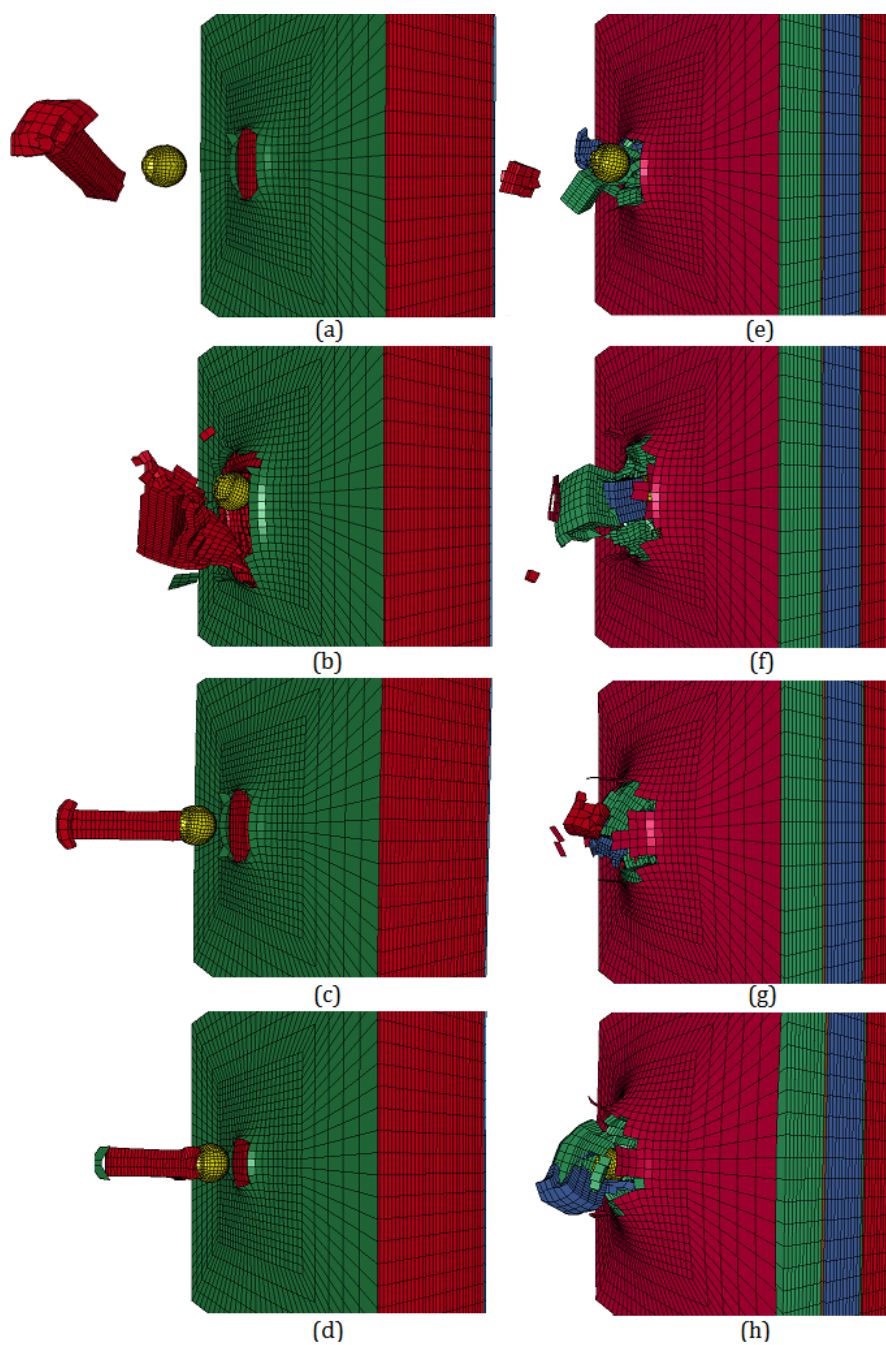


Figura 6.3: Deformação da malha de elementos finitos durante a perfuração do projectil esférico: (a) Alvo com duas placas e espuma de 10 ppi; (b) Alvo com quatro placas e espuma de 10 ppi; (c) Alvo com duas placas e espuma de 30 ppi; (d) Alvo com quatro placas e espuma de 30 ppi; (e) Alvo com duas placas e espuma de 10 ppi revestida; (f) Alvo com quatro placas e espuma de 10 ppi revestida; (g) Alvo com duas placas e espuma de 30 ppi revestida; (h) Alvo com quatro placas e espuma de 30 ppi revestida.

Capítulo 7

Influência da velocidade do projectil

Uma vez analisado o desempenho dos vários alvos, foi estudada a influência da velocidade inicial do projectil na capacidade de absorção de energia de um dos alvos. O modelo numérico escolhido para estas simulações foi o referenciado como EA30Ni4P, pois de todos os testados é o que apresenta melhores resultados.

Como se verificou anteriormente, esta estrutura *sandwich* tem a capacidade de absorver cerca de 97% da energia de um projectil esférico num impacto a uma velocidade $v_0 = 300$ m/s. Seguidamente, apresentam-se os resultados obtidos para diferentes velocidades de impacto.

Uma vez que o projectil utilizado possui 10 mm de diâmetro, será razoável comparar o seu efeito destrutivo a um projectil de calibre 0,38" (9,65 mm) [Hamilton 94]. Este projectil é usualmente disparado à velocidade máxima de $v_0 = 289,5$ m/s e apresenta uma massa de 13,15 g, no entanto, o projectil esférico utilizado no âmbito deste trabalho possui massa $m = 4$ g. De modo a ser possível realizar uma comparação válida, calculou-se a energia cinética associada ao disparo do projectil normalizado. O valor obtido permite determinar a velocidade máxima a utilizar nos ensaios numéricos de modo a simular os efeitos do projectil de calibre 0,38".

A equação $E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2$ permite-nos calcular que a energia cinética do projectil normalizado no momento do impacto é $E_c = 551,05$ J. De acordo com os cálculos realizados, variou-se a velocidade inicial do projectil esférico entre a velocidade mínima $v_{min} = 350$ m/s e uma velocidade máxima $v_{max} = 525$ m/s e fez-se uma análise da variação da energia absorvida pelo alvo.

No gráfico da figura 7.1 podem observar-se as curvas da energia cinética dos projecteis disparados a 350, 400, 450, 500 e 525 m/s, às quais corresponde os valores de energia cinética iniciais, visíveis no gráfico. Após $\Delta t = 0,20$ s do início do impacto todos os projecteis já perfuraram totalmente o alvo com velocidades residuais muito reduzidas. Esta afirmação é comprovada quando se observam os resultados apresentados no gráfico

da figura 7.2, onde também se pode analisar em termos relativos a energia absorvida pela estrutura para cada velocidade inicial do projectil. No intervalo de velocidades testado, não se verificam diferenças significativas em termos de energia absorvida pelo alvo. Para a velocidade mais baixa, $v_{min} = 350$ m/s, cerca de 95,3% da energia é absorvida enquanto que para a mais elevada ($v_{max} = 525$ m/s) esse valor decresce para 94,1%, o que leva a assumir que esta combinação de estrutura com espuma mais densa e revestida com níquel apresenta um óptimo desempenho contra projecteis de calibre 0,38".

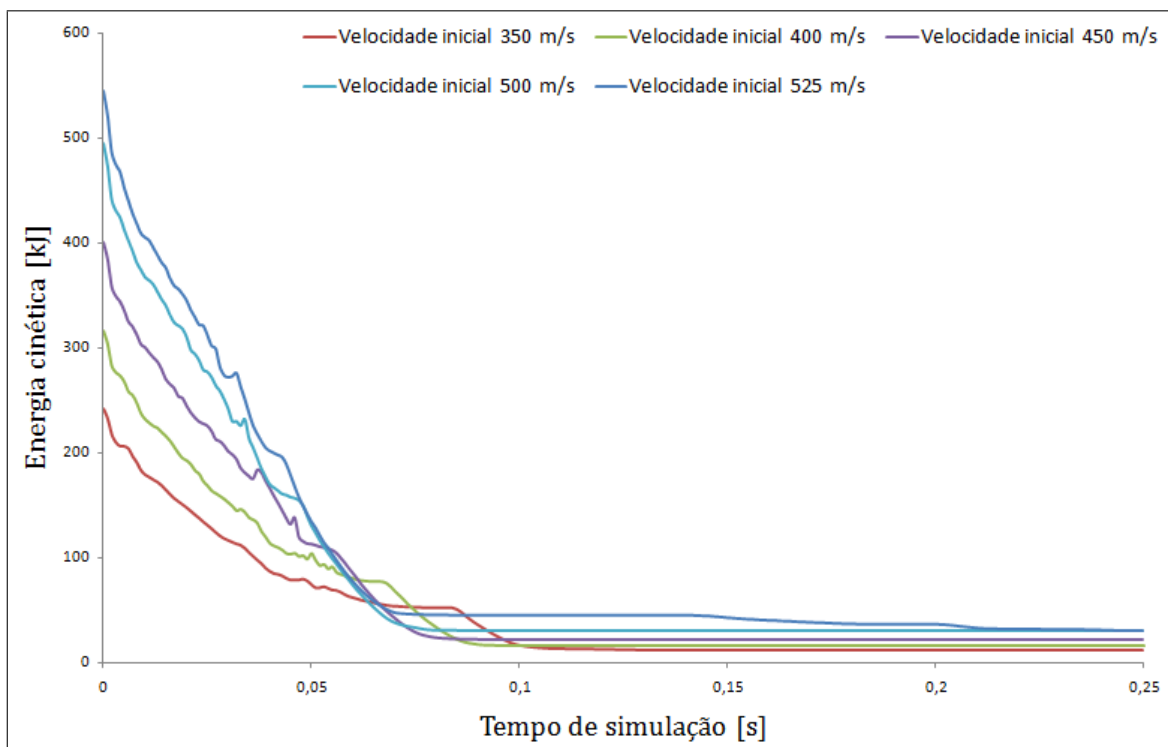


Figura 7.1: Evolução da energia cinética dos projecteis disparados a 350, 400, 450, 500 e 525 m/s.

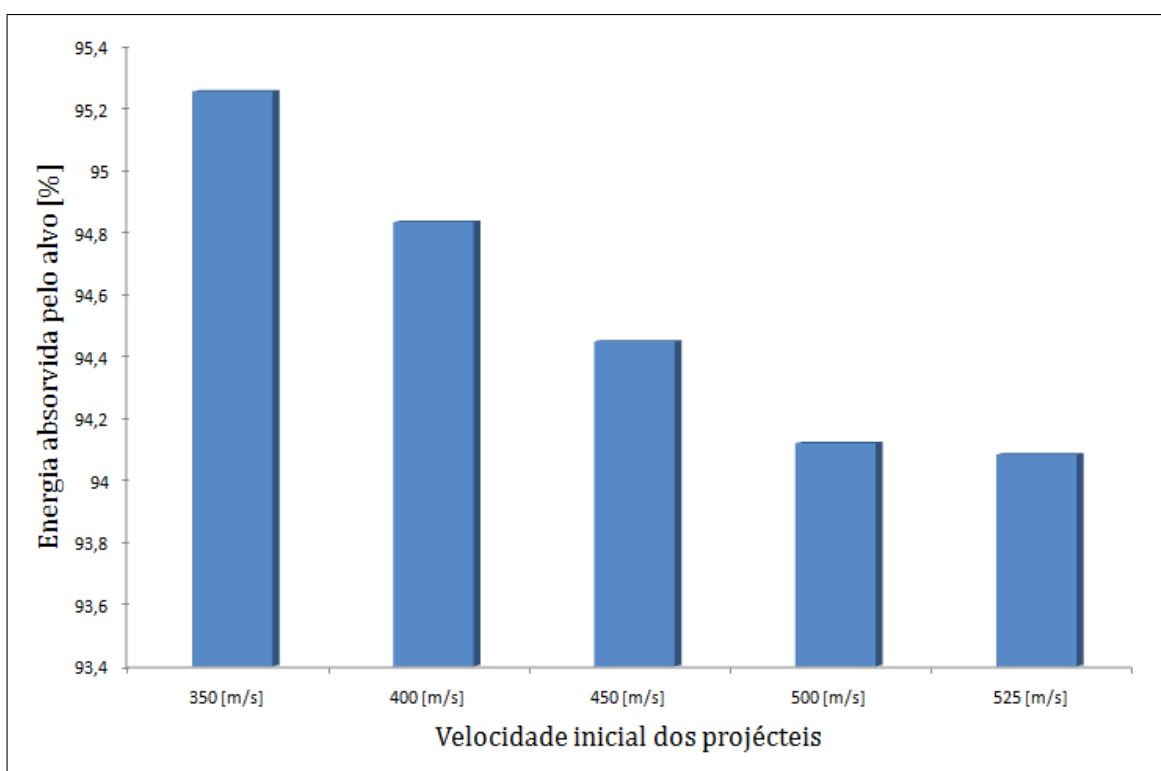


Figura 7.2: Energia absorvida pelos alvos aquando do impacto dos projecteis disparados a 350, 400, 450, 500 e 525 m/s.

Capítulo 8

Impacto de FSP

Nas simulações que utilizam projecteis FSP (*fragment simulating projectiles*), estudam-se os impactos com a velocidade inicial mínima necessária para que os projecteis perfurem totalmente o alvo. Deste modo pode verificar-se a influência da massa e dimensões do projectil na velocidade e energia necessárias para que este concretize a sua função.

Na figura 8.1 observam-se os perfis de velocidade dos vários fragmentos. Verifica-se que o projectil com 20 mm de diâmetro, necessita apenas de uma velocidade inicial $v_0 = 90$ m/s para penetrar o alvo na sua totalidade, enquanto que o projectil mais pequeno (calibre 0,22") necessita de ser projectado a $v_0 = 600$ m/s para conseguir atravessar o alvo. Esta diferença relaciona-se directamente com a massa dos projecteis, pois enquanto o projectil de 20 mm possui uma massa $m = 53$ g, o de calibre 0,22" possui uma massa de apenas $m = 1,1$ g.

Os projecteis FSP de calibres 0,30" e 0,50" têm massas $m = 2,8$ g e $m = 13,4$ g, respectivamente. Como seria de esperar, as velocidades iniciais encontram-se em pontos intermédios quando comparadas com os anteriores. O projectil de calibre 0,30" necessita de uma velocidade inicial $v_0 = 300$ m/s para perfurar totalmente o alvo, enquanto que o de calibre 0,50" necessita de uma velocidade inicial $v_0 = 150$ m/s. Verifica-se ainda que os projecteis FSP com maior massa necessitam de mais tempo para perfurar o alvo.

Na figura 8.2 pode observar-se a evolução da energia cinética dos projecteis FSP após o impacto com o alvo, verifica-se que o comportamento destas curvas acompanha o da velocidade devido à relação directa entre as duas grandezas. Como seria de esperar, os valores da energia cinética final de todos os projecteis FSP são consideravelmente baixos, tal como as velocidades residuais.

A deformação e rotura dos alvos, podem ser observadas na figura 8.3. Nas figuras 8.3(a) e (b) observa-se a deformação da malha de elementos finitos provocada pelos projecteis

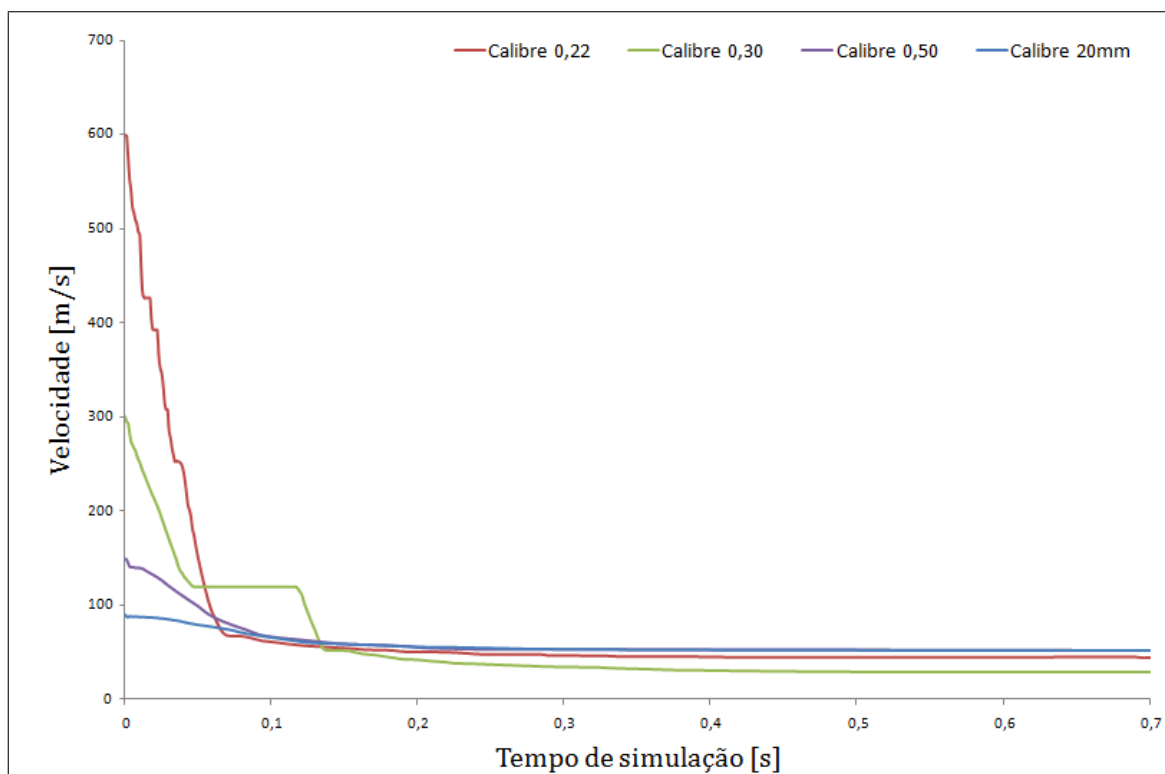


Figura 8.1: Perfis da velocidade dos projéteis FSP com diferentes calibres ao perfurarem o alvo.

FSP de calibres 0,22" e 0,30", e nas figuras 8.3 (c) e (d), observam-se os danos causados pelos projéteis de calibres 0,50" e 20 mm. Analisando as várias imagens, pode concluir-se que quanto maior a dimensão (massa) dos projéteis, maiores são os danos causados à estrutura. Como verificado anteriormente, nos impactos com o projétil esférico, alguns elementos finitos das placas de alumínio são eliminados do modelo, efeito causado pelos critérios de falha do material definidos na secção 4.1.2.

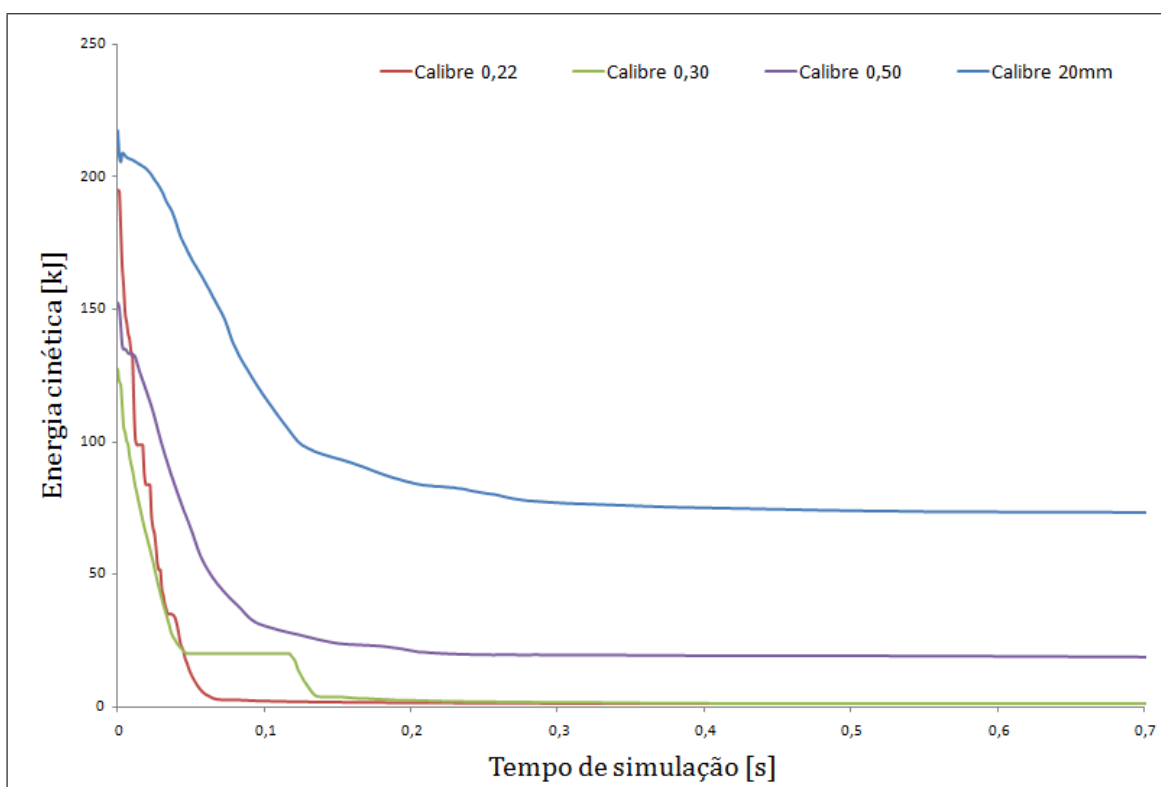


Figura 8.2: Evolução da energia cinética dos projecteis FSP com diferentes calibres ao penetrarem o alvo.

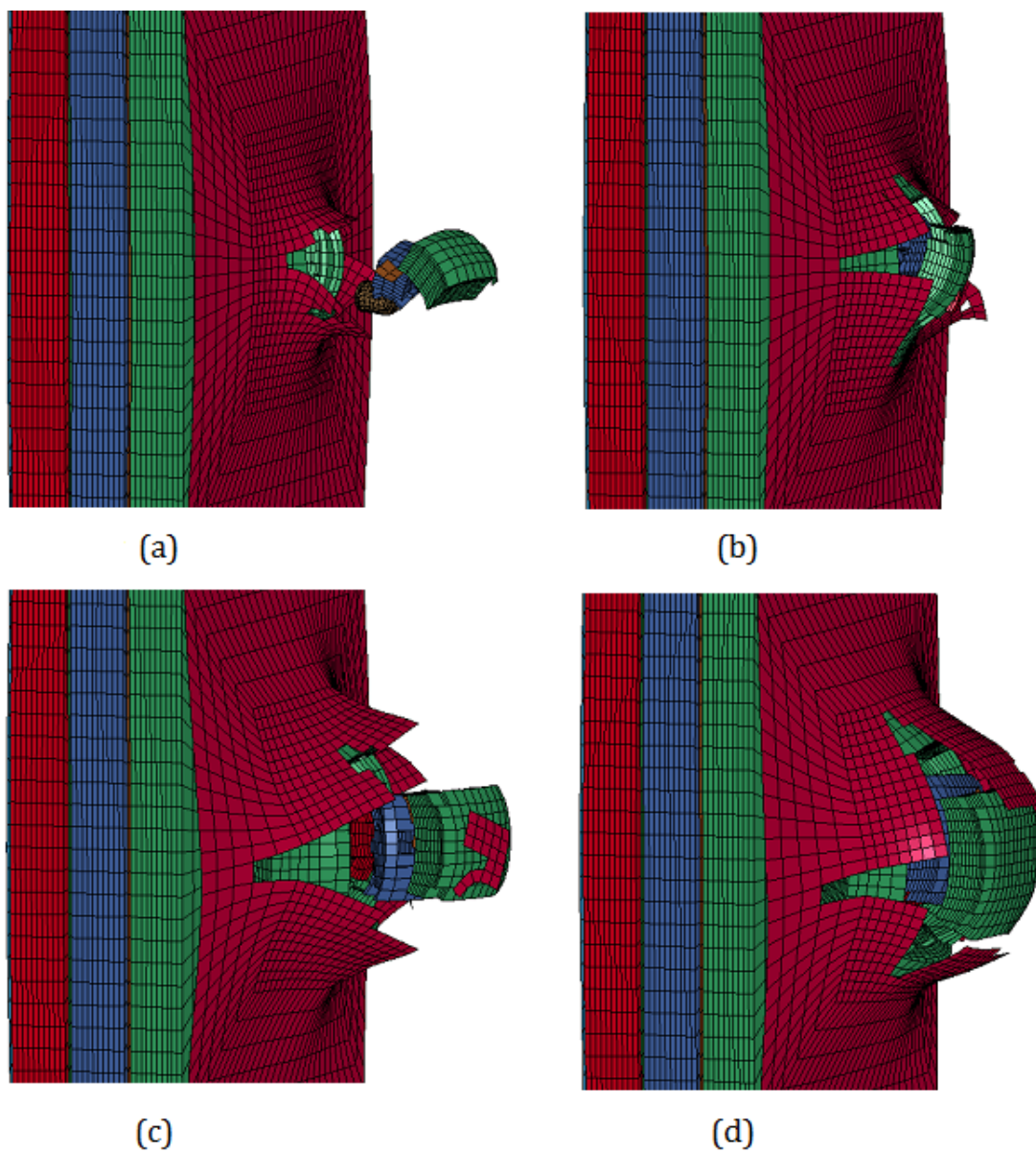


Figura 8.3: Deformação da malha de elementos finitos dos alvos para o impacto dos projecteis FSP de calibres: (a) 0,22"; (b) 0,30"; (c)0,50"; 20 mm.

Parte IV

Considerações finais

Capítulo 9

Conclusões

O objectivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento e validação de um conjunto de modelos numéricos, baseados em testes balísticos experimentais realizados com o intuito de avaliar a resposta dinâmica de alvos com núcleos de espuma revestida. É estudado o comportamento de espumas de alumínio de célula aberta, constituídas pela liga de alumínio AlSi7Mg03, incorporadas em estruturas *sandwich*, quando sujeitas ao impacto de um projectil disparado a uma velocidade $v_0 = 300$ m/s.

Inicialmente, foram realizados ensaios numéricos com duas espumas de diferentes densidades. A primeira com dez poros por polegada (10 ppi), e a segunda, de maior densidade, com trinta poros por polegada (30 ppi).

Além da variação da densidade da espuma, procedeu-se à alteração de um parâmetro que influencia significativamente os resultados obtidos: a configuração geométrica das estruturas *sandwich*. Foram modeladas duas estruturas diferentes, uma constituída por duas placas fabricadas em alumínio com uma pureza de 99,5% e núcleo constituído por um bloco de 30 mm de espessura em espuma de alumínio, outra constituída por quatro placas de blindagem separadas por três blocos de 10 mm de espessura cada.

Após realizados e validados os resultados numéricos realizados nos alvos acima descritos, foram simulados novos modelos, com as mesmas características geométricas e densidades. Nestes ensaios, foram alteradas as propriedades das espumas de modo a simular a aplicação de revestimento com $50 \mu\text{m}$ em níquel.

Em todas as simulações foram registados os perfis de velocidade e variação da energia cinética do projectil, de modo a verificar o benefício do revestimento de níquel em termos de absorção de energia, bem como a influência da densidade da espuma de alumínio e da configuração geométrica do alvo.

Quanto à configuração geométrica da estrutura *sandwich*, verifica-se que o alvo composto por quatro placas de blindagem e três camadas de espuma forma um sistema aproximadamente 35% mais eficaz que o de duas placas.

Relativamente à densidade, observa-se que a espuma com 30 ppi oferece mais resistência à passagem do projectil do que a espuma de 10 ppi, registando-se um aumento de 10% na quantidade de energia absorvida para o ensaio EA30Ni4P.

Analisados os resultados das simulações numéricas realizadas com e sem revestimento de níquel, em condições idênticas, verificou-se que a aplicação deste nas espumas de alumínio aumenta a capacidade de absorção de energia dos alvos. O alvo com duas placas de blindagem e espuma de menor densidade revelou ser o que mais beneficia da introdução do níquel, pois apresenta um aumento de 25% na energia absorvida relativamente ao seu homólogo sem revestimento.

Quando confrontados os resultados de todos os ensaios e analisada a variação de energia cinética verifica-se claramente que a estrutura que absorve mais energia, e por conseguinte a que apresenta melhor resistência à passagem de um projectil, é a estrutura *sandwich* composta por quatro placas de blindagem e três camadas de espuma de alumínio de 30 ppi revestida com níquel. Para esta configuração a velocidade residual do projectil é aproximadamente $v_{res} = 45$ m/s, o que se traduz numa redução de cerca de 83% da velocidade de impacto e numa redução da energia cinética inicial de aproximadamente 98%.

Verifica-se ainda que as placas de blindagem ajudam a distribuir de uma forma radial e mais dispersa as forças aplicadas na estrutura. Este mesmo efeito pode observar-se nas figuras 9.1 e 9.2.

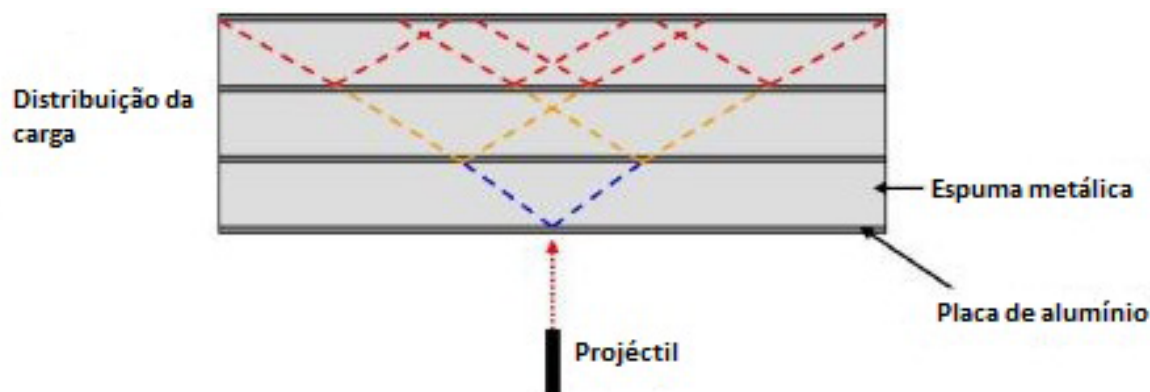


Figura 9.1: Esquema da distribuição da carga aplicada na estrutura.

As simulações realizadas com velocidades iniciais superiores a $v_0 = 300$ m/s, revelam que a variação da velocidade de impacto até $v_{max} = 525$ m/s resulta num decréscimo de apenas 3% na energia que o alvo consegue absorver.

Finalmente, realizaram-se ensaios numéricos com quatro projecteis FSP (*fragment simulating projectiles*) de diferentes calibres, de modo a determinar as velocidades de impacto mínimas necessárias para que estes atravessassem totalmente o alvo. O alvo

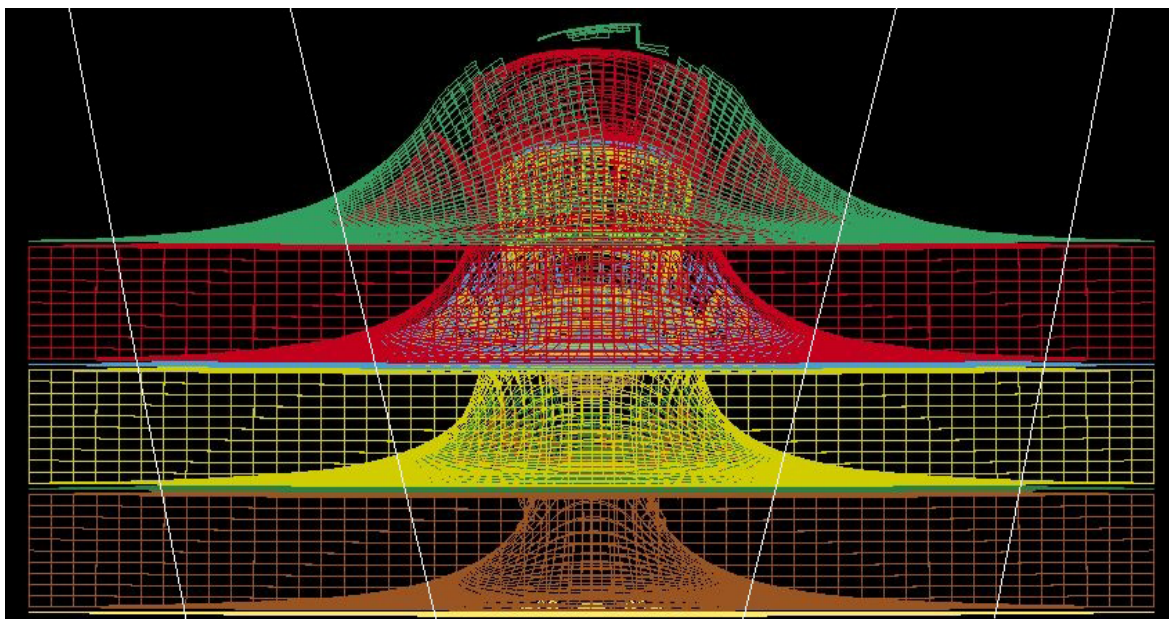


Figura 9.2: Representação da distribuição da carga nos elementos finitos da do alvo.

seleccionado para a realização destes testes foi o referenciado como EA30Ni4P, dado ser o que apresentou melhor desempenho em termos de absorção de energia nos testes anteriores.

Analisando os resultados, verifica-se que o fragmento de maiores dimensões (calibre 20 mm), com massa $m = 53$ g, necessita de atingir o alvo com uma velocidade $v_0 = 90$ m/s, enquanto que o fragmento de menores dimensões (calibre 0,22"), com massa $m = 1,1$ g, necessita de uma velocidade inicial $v_0 = 600$ m/s.

Estes testes com fragmentos normalizados mostram claramente a influência que a massa do projectil produz na velocidade e conseqüente energia necessária para existir perfuração total do alvo.

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de materiais celulares de: (a) célula aberta e (b) célula fechada [Jung 09b].	6
1.2	Exemplo de estrutura <i>sandwich</i> com núcleo em alumínio [Banhart 00].	7
1.3	Exemplo da distribuição de tensões equivalente de von Mises para uma simulação numérica de impacto ortogonal e de um impacto a 80°, de um projectil rígido 7,62 × 51 [mm] NATO num alvo de espessura de 5 mm [Grilo 09].	9
4.1	Representação esquemática da configuração experimental dos ensaios balísticos realizados no ISL [Jung 09b].	18
4.2	Sistema de suporte dos alvos utilizados nos impactos balísticos realizados [Jung 09b].	18
4.3	Configurações das estruturas <i>sandwich</i> : (a) Configuração de quatro placas de blindagem com núcleo em espuma de alumínio 10 ppi (EA10SR/Ni4P): (b) Configuração de quatro placas de blindagem com núcleo em espuma de alumínio 30 ppi (EA30SR/Ni4P): (c) Configuração de duas placas de blindagem com núcleo em espuma de alumínio de 10 ppi (EA10SR/Ni2P): (d) Configuração de duas placas de blindagem com núcleo em espuma de alumínio de 30 ppi (EA30SR/Ni2P) [Jung 09b].	19
4.4	Estruturas <i>sandwich</i> discretizadas em elementos finitos: (a) Alvo com duas placas de blindagem, (b) Alvo com quatro placas de blindagem.	21
4.5	Representação das curva de tensão-deformação das espumas de 10 ppi, 30 ppi, sem revestimento e 10 ppi, 30 ppi com revestimento.	23
4.6	Representação do nós fixos na estrutura (evidenciados a azul).	24
4.7	Dispersão dos valores da tensão máxima de von Mises para diferentes dimensões dos elementos.	25
4.8	Vista frontal das malhas de elementos finitos testadas na fase de optimização de malha: (a) $l = 10$ mm, (b) $l = 54$ mm, (c) $l = 3,3$ mm, (d) $l = 2,5$ mm, (e) $l = 2$ mm, (f) $l = 1,5$ mm.	26

4.9	Desenho de definição do projétil FSP de calibre 0,22".	28
4.10	Desenho de definição do projétil FSP de calibre 0,30".	29
4.11	Desenho de definição do projétil FSP de calibre 0,50".	29
4.12	Desenho de definição do projétil FSP de 20 mm.	30
5.1	Velocidades residuais obtidas experimentalmente[Jung 09a]	34
5.2	Perfil da velocidade do projétil na simulação com duas placas de blindagem e espuma de alumínio de 10 ppi sem revestimento (referenciado como EA10SR2P).	35
5.3	Perfil da velocidade do projétil na simulação de quatro placas de blindagem e espuma de alumínio de 10 ppi sem revestimento (referenciado como EA10SR4P).	36
5.4	Perfil da velocidade do projétil na simulação de duas placas de blindagem e espuma de alumínio de 10 ppi revestida (referenciado como EA10Ni2P).	37
5.5	Perfil da velocidade do projétil na simulação de quatro placas de blindagem e espuma de alumínio de 10 ppi revestida (referenciado como EA10Ni4P).	38
5.6	Perfil da velocidade do projétil na simulação de duas placas de blindagem e espuma de alumínio de 30 ppi sem revestimento (referenciado como EA30SR2P).	38
5.7	Perfil da velocidade do projétil na simulação de quatro placas de blindagem e espuma de alumínio de 30 ppi sem revestimento (referenciado como EA30SR4P).	39
5.8	Perfil da velocidade do projétil na simulação de duas placas de blindagem e espuma de alumínio de 30 ppi revestida com níquel (referenciado como EA30Ni2P).	39
5.9	Perfil da velocidade do projétil na simulação de quatro placas de blindagem e espuma de alumínio de 30 ppi revestida com níquel (referenciado como EA30Ni4P).	40
6.1	Evolução da energia cinética do projétil ao longo do tempo, para todos os ensaios realizados.	41
6.2	Energia absorvida pelos alvos simulados numericamente.	43

6.3	Deformação da malha de elementos finitos durante a perfuração do projétil esférico: (a) Alvo com duas placas e espuma de 10 ppi; (b) Alvo com quatro placas e espuma de 10 ppi; (c) Alvo com duas placas e espuma de 30 ppi; (d) Alvo com quatro placas e espuma de 30 ppi; (e) Alvo com duas placas e espuma de 10 ppi revestida; (f) Alvo com quatro placas e espuma de 10 ppi revestida; (g) Alvo com quatro placas e espuma de 30 ppi revestida.	45
7.1	Evolução da energia cinética dos projéteis disparados a 350, 400, 450, 500 e 525 m/s.	48
7.2	Energia absorvida pelos alvos aquando do impacto dos projéteis disparados a 350, 400, 450, 500 e 525 m/s.	49
8.1	Perfis da velocidade dos projéteis FSP com diferentes calibres ao perfurarem o alvo.	52
8.2	Evolução da energia cinética dos projéteis FSP com diferentes calibres ao penetrarem o alvo.	53
8.3	Deformação da malha de elementos finitos dos alvos para o impacto dos projéteis FSP de calibres: (a) 0,22"; (b) 0,30"; (c) 0,50"; 20 mm.	54
9.1	Esquema da distribuição da carga aplicada na estrutura.	58
9.2	Representação da distribuição da carga nos elementos finitos da do alvo.	59

Lista de Tabelas

4.1	Materiais utilizados na caracterização do comportamento mecânico ao impacto e respectivas siglas.	20
4.2	Propriedades dos materiais utilizados nas placas de blindagem e projétil.	21
4.3	Propriedades dos materiais celulares utilizados nas simulações numéricas.	22
4.4	Referências e características dos ensaios realizados para otimização da malha de elementos finitos.	24
4.5	Características dos fragmentos simulados (FSP)segundo a norma MIL-DTL-46593B.	27
4.6	Propriedades mecânicas do material utilizado nos projéteis FSP.	28
5.1	Velocidades residuais obtidas experimentalmente e através de simulação numérica.	40
6.1	Variação da energia cinética do projétil e absorção de energia do alvo.	42

Bibliografia

- [A.R.L. 06] A.R.L. *Detail specification projectile, calibers .22, .30, .50, and 20 mm Fragment-simulating*, 2006.
- [Ashby 00] M.F. Ashby e N.A. Fleck. *Metal Foams: a Design Guide*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [Banhart 00] John Bhanhart. Manufacturing routes for metallic foams. *JOM*, vol. 12, pp. 22–2, 2000.
- [Boonyongmaneerat 08] Yuttanant Boonyongmaneerat, Christopher A. Schuh e David C. Dunand. Mechanical properties of reticulated aluminum foams with electrodeposited ni-w coatings. *Scripta Materialia*, vol. 59, no. 3, pp. 336 – 339, 2008.
- [Gama 01] Bazle A. Gama, Travis A. Bogetti, Bruce K. Fink, Chin-Jye Yu, T. Dennis Claar, Harald H. Eifert e John W. Gillespie Jr. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. *Composite Structures*, vol. 52, no. 3-4, pp. 381 – 395, 2001.
- [Goldsmith 92] W. Goldsmith e Sackman JL. An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 12, pp. 241–262, 1992.
- [Grilo 09] Maria Ana Mendes Grilo. *Efeito de parâmetros da ameaça em alvos metálicos*. PhD thesis, Universidade de Aveiro, 2009.
- [Hallquist 98] J.O. Hallquist. *Ls-Dyna Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation, Maio 1998.
- [Hamilton 94] Milton H. Hamilton. *Army ammunition data sheets small caliber ammunition FSC 1305*. U.S. government, 1994.

- [Iremonger 96] M. J. Iremonger e A. C. Went. Ballistic impact of fibre composite armours by fragment-simulating projectiles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 7, pp. 575 – 581, 1996.
- [Jerz 03] J. Jerz, F. Simancik, M. Bortel, S. Kubo e J. Kováčik. The design of lightweight armour sheets. *Cellular Metals and Metal Foaming Technology.*, vol. 1, pp. 4, 2003.
- [Jung 09a] A. Jung, H. Natter, R. Hempelmann, E. Lach, A. Bohmann e N. Faderl. *Nano nickel strengthened open cell metal foams under quasistatic and dynamic loading*. DYMAT 2009 - 9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, vol. Volume 1, pp. 717 – 723, 2009.
- [Jung 09b] A. Jung, H. Natter, R. Hempelmann, E. Lach, A. Bohmann e N. Faderl. *Nano nickel strengthened open cell metal foams under quasistatic and dynamic loading*. Rapport technique, Universitat des Saarlandes and French-German Research of Saint-Louis, 2009.
- [Jussila 05] Jorma Jussila. *Wound ballistic simulation: Assessment of the legitimacy of law enforcement firearms ammunition by means of wound ballistic simulation*. PhD thesis, University of Helsinki, 2005.
- [Librescu 00] Liviu Librescu e Terry Hause. Recent developments in the modeling and behavior of advanced sandwich constructions: a survey. *Composite Structures*, vol. 48, no. 1-3, pp. 1 – 17, 2000.
- [Mines 98] R. Mines, CM Worrall e AG. Gibsson. Low velocity perforation behaviour of polymer composite sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 10, pp. 855–879, 1998.
- [Netto 06] S. E. Netto, L. Neto e L. Shaeffer. Corte & conformação de metais, capítulo Como são obtidas as espumas metálicas para formação de estruturas do tipo sandwich, pp. 46–53. Arandanet, 2006.

- [Paulino 09] M. Paulino, F. Teixeira-Dias, E. Lach, T. Wolf e M. Bramc. Security and use of innovative technologies against terrorism, chapitre Mechanical behaviour of highly porous Titanium under dynamic loading, pp. 187–201. Universidade de Aveiro, 2009. Presented in LWAG.
- [Styles 07] M. Styles, P. Compston e S. Kalyanasundaram. The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foam sandwich structures. *Composite Structures*, vol. 80, no. 4, pp. 532 – 538, 2007.
- [Teixeira-Dias 09] F. Teixeira-Dias, R. Valente, A. Pinho e R. Sousa. *Método dos Elementos Finitos*. LIDEL, 2009.
- [Villanueva 04] G. Villanueva e W. J. Cantwell. The high velocity impact response of composite and fml-reinforced sandwich structures. *Composites Science and Technology*, vol. 64, no. 1, pp. 35 – 54, 2004.
- [Wambua 07] Paul Wambua, Bart Vangrimde, Stepan Lomov e Ignaas Verpoest. The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles. *Composite Structures*, vol. 77, no. 2, pp. 232 – 240, 2007.
- [Zhao 07] H. Zhao, I. Elnasri e Y. Girard. Perforation of aluminium foam core sandwich panels under impact loading—an experimental study. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 34, no. 7, pp. 1246 – 1257, 2007.

