FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Modelling, simulation and test of ballistic panels

Renata Alexandra Nogueira Dias



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor António Torres Marques

Co-orientador: Doutor Luís Miguel Pereira Pina

Co-orientador: Doutor Ricardo Fernando Rodrigues Pinto

Setembro de 2017

Modelling, simulation and test of ballistic panels

Renata Alexandra Nogueira Dias

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro de 2017

Resumo

Os avanços tecnológicos referentes ao armamento e à sua capacidade de penetração estão em constante evolução, o que torna necessário que as alternativas de proteção disponíveis também estejam em constante reavaliação.

Começando por uma breve referência aos modos de defesa do Homem nos primórdios da sua existência até aos materiais utilizados atualmente, neste trabalho é feita uma abordagem ao estudo da proteção face a ameaças balísticas.

É feita uma referência aos modos de análise possíveis, energético, experimental e numérico, sendo o último o foco do trabalho. É proposto um modelo de simulação simples que permite uma avaliação rápida da situação de impacto podendo descartar a hipótese de estudo daquele par projétil-alvo a priori ou prosseguir para uma análise mais detalhada.

A validação deste modelo é feita com base na literatura para materiais compósitos, dúcteis e cerâmicos. É analisada a velocidade de saída do projétil e a área danificada do alvo, quando variada a velocidade de entrada, o ângulo de impacto do projétil e a espessura do alvo. Relativamente à velocidade de entrada, os resultados obtidos apresentam uma boa relação com os disponíveis na literatura numa gama de velocidades dos 200-900 m/s, para espessuras de alvo até 20 mm. No que diz respeito à área danificada, os resultados obtidos são bastante dispersos e dificilmente analisáveis, uma vez que é escassa a existência de termos de comparação na literatura.

Recorrendo ao modelo proposto, estudou-se o comportamento do material compósito Hexcel IM7-8552 face a impacto balístico. Considerando apenas este material, a sua resistência balística é baixa. Assim sendo, optou-se pelo estudo de um painel híbrido com materiais compósitos, dúcteis ou cerâmicos. Observou-se um aumento considerável da resistência balística acrescentando um inserto cerâmico na parte frontal do painel ou um prato metálico na parte posterior. Chegou-se à conclusão que a configuração que oferece maior resistência balística é aquela que passa pela combinação dos três tipos de materiais, cerâmico, compósito e dúctil, sendo esta a ordem de empilhamento dos mesmos, da parte frontal para a posterior.

Palavras chave: Alta velocidade, balística, cerâmico, compósito, dúctil, impacto, proteção, simulação numérica

Abstract

The technological advances when it comes to personal armor need to be in constant evolution due to the higher capability of penetration of new types of projectiles.

Starting with a brief reference to how Men protected themselves in prehistoric times to the materials used now, the present work studies the behavior of protections against ballistic threats.

A reference to the different kinds of analysis is made, energetical, experimental and numerical, being the last one the focus of the present work. A simple simulation model which allows a fast analysis of the impact phenomenon is proposed. Using this model, it is possible to discard the studies of a target-projectile pair or decide to advance to a more detailed analysis.

This model is validated for composite, ductile and ceramic materials according to literature. Varying the impact angle and entry velocity of the projectile and also the thickness of the target, it is possible to evaluate projectile residual velocity and target damaged area. When it comes to entry velocity, the results have a good correlation with the literature for a range from 200-900 m/s, for target thicknesses up to 20 mm. On the account of damaged area, the results available in literature are scarce and since the results obtained are quite random, it is hard to analyse this parameter.

Using the proposed model, the ballistic behavior of the composite material Hexcel IM7-8552 is studied. If you consider it by itself, its ballistic resistance is very low. Therefore, a study on a hybrid target with composite, ductile and ceramic materials was proposed. A significant improvement in ballistic resistance was observed when adding a ceramic plate on the front of the plate or a aluminum sheet on the back of it. It was concluded that the best layup is the one that involves a combination of all three materials, ceramic, composite and ductile. Being this the stacking order used on the specimen studied.

Keywords: Ballistic, ceramic, composite, ductile, high velocity, impact, numerical simulation, protection

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, o Professor Doutor António Torres Marques, da FEUP, e ao Doutor Luís Miguel Pereira Pina, do INEGI, pelo acompanhamento prestado ao longo deste semestre de trabalho árduo.

Ao Doutor Ricardo Fernando Rodrigues Pinto, também meu orientador, e ao Seif Sadek, também do INEGI, os maiores entendidos em simulação numérica que já conheci, pelas horas e horas que perderam a ajudar-me e a sua paciência incansável para as minhas dúvidas constantes.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, por toda a força e apoio prestado ao longo deste tempo de trabalho, mas sobretudo pelo companheirismo sentido nestes 5 anos juntos, tal e qual como uma família. Portanto, Diogo, Eduardo, Francisco, Graça, Hugo, Joana, João, Miguel, Rita, Rúben, Sara, Tiago e Vasco, obrigada por serem a minha segunda família e me fazerem sentir em casa todos os dias. Espero que assim continue por muito tempo.

Agradeço também aos que apareceram mais tarde, mas deixaram a sua marca, os meus amigos das disquetes. À Bárbara e à Beatriz, queria agradecer por se terem tornado duas parceiras, companheiras de muitas horas e muitas gargalhadas.

Aos meus pequenos, sem vocês também não seria a mesma coisa. Obrigada pela força, mas, mais que tudo, pelo voto de confiança que depositaram em mim. Espero que sintam tanto orgulho em mim, como aquele que sinto em vocês.

À Luísa, ao Miguel, ao Nuno e à Joana, muito obrigada!

Bernardo, obrigada por toda a força e motivação... Por tudo!

Por último gostaria de agradecer à minha família, aos meus irmãos e pais, por todo o apoio incondicional e pela oportunidade de estar aqui hoje, porque, no fim de tudo, isto deve-se a eles. Um enorme obrigada é pouco!

Renata Dias

Este trabalho utilizou resultados provenientes dos seguintes projetos:

- ALIR_mcs - Advanced Lightweight Impact Resistant: materials, components and structures (POCI-01-0247-FEDER-017751), financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI)
- PASSARO - Capabilities for Innovative Structural and functional testing of aerostructures (SEP-699773, AIRFRAME ITD Grant Agreement n°: CSJU-GAM-AIR-2016-2017-1), financiado pela Comissão Europeia através do programa Horizon 2020 / Clean Sky JU, call H2020-CS2-CPW02-2015-01, topic JTI-CS2-2015-CPW02-AIR-02-06

"I have not failed.
I've just found 10 000 ways that won't work."

Thomas A. Edison

Conteúdo

1 Introdução **1**
- 1.1 Enquadramento . . . 1
- 1.2 Motivação . . . 1
- 1.3 Objetivos . . . 2
- 1.4 Estrutura da Dissertação . . . 2

2 Introdução à proteção balística pessoal **3**
- 2.1 Contextualização histórica . . . 3
- 2.2 Conceitos básicos sobre proteção balística . . . 5
  - 2.2.1 Projétil . . . 5
  - 2.2.2 Painel balístico . . . 7
  - 2.2.3 Impacto balístico . . . 7
  - 2.2.4 Limite balístico . . . 8
- 2.3 Materiais tipicamente utilizados em aplicações balísticas . . . 8
  - 2.3.1 Fibras de aramida . . . 9
  - 2.3.2 Polietileno de muito alto peso molecular (UHMWPE) . . . 10
  - 2.3.3 Cerâmicos . . . 10

3 Estado da arte **13**
- 3.1 Análise do impacto balístico . . . 13
  - 3.1.1 Análise energética . . . 15
  - 3.1.2 Ensaios experimentais . . . 17
  - 3.1.3 Simulação numérica . . . 20

4 Materiais utilizados **31**
- 4.1 Compósitos laminados . . . 31
  - 4.1.1 Kevlar® e resina de epóxido . . . 31
  - 4.1.2 Fibra de carbono e resina de epóxido . . . 32
  - 4.1.3 Kevlar® e PVB . . . 32
  - 4.1.4 Dyneema® HB26 . . . 32
  - 4.1.5 Fibra de vidro E-Glass e resina de epóxido . . . 32
  - 4.1.6 Twaron® . . . 33
  - 4.1.7 Hexcel IM7-8552 . . . 33
- 4.2 Materiais dúcteis . . . 33
  - 4.2.1 Aço . . . 33
  - 4.2.2 Alumínio . . . 34
- 4.3 Materiais cerâmicos . . . 34
  - 4.3.1 Carboneto de boro . . . 34

4.3.2 Alumina 99.5% . . . 35
4.3.3 Carboneto de silício . . . 35

5 Método dos Elementos Finitos 37
5.1 Software utilizado - ABAQUS® . . . 37
5.2 Considerações iniciais . . . 38
5.3 Modelos de dano . . . 40
5.3.1 Critério de Hashin . . . 40
5.3.2 Critério de Johnson-Cook . . . 41
5.3.3 Critério de Johnson-Holmquist . . . 42
5.4 Validação numérica com base na literatura . . . 44
5.4.1 Materiais compósitos . . . 44
5.4.2 Materiais dúcteis . . . 71
5.4.3 Materiais cerâmicos . . . 80
5.4.4 Alumina 99.5% e alumínio 5083-H116 . . . 88
5.5 Discussão . . . 93

6 Simulações numéricas do impacto em alvos em IM7-8552 95
6.1 Material de base . . . 95
6.2 Hibridização . . . 101
6.2.1 Compósito com material dúctil . . . 102
6.2.2 Cerâmico com material compósito . . . 105
6.2.3 Cerâmico com compósito e material dúctil . . . 107
6.3 Discussão dos resultados obtidos . . . 110

7 Discussão, conclusões e trabalhos futuros 113

Referências 115

Anexo A 121

Anexo B 151

Lista de Figuras

2.1 Legionário romano com armamento pesado (século III a.C) [4] 3
2.2 Armaduras do século XII (esquerda) e do século XIV (direita) [5] 4
2.3 Munição [67] 5
2.4 Diferentes geometrias de projéteis [55] 6
2.5 Três regiões distintas do projétil, representado em corte transversal [67] 7
2.6 Fibra de Kevlar® [34] 9
2.7 Capacetes balísticos fabricados em Dyneema® [10] 10
2.8 Diagrama esquemático de um painel balístico com materiais cerâmicos e compósitos [53] 11

3.1 Alvo com 102 mm de espessura que sofreu impacto por parte de um projétil com velocidade inferior ao limite balístico [63] 13
3.2 Identificação das fibras primárias e secundárias num compósito (a) Cone de deformação (b) [59] 14
3.3 Fases de penetração de um projétil cilíndrico num painel [60] 15
3.4 Formação do cone na parte posterior do alvo no momento do impacto [61] 16
3.5 Montagem de um ensaio de impacto balístico [62] 17
3.6 Diagrama esquemático de uma montagem típica de ensaios balísticos [53] 18
3.7 Formação do cone na parte posterior do painel compósito [59] 18
3.8 Exemplo de montagem utilizando dispositivos infravermelhos para efetuar a medição [19] 19
3.9 Comparação entre o impacto no centro e no canto do alvo em diferentes instantes [26] 20
3.10 Secção reta de um laminado impactado por um projétil a 92 m/s com um ângulo de 0° (esquerda) e com um ângulo de 45° (direita) [54] 20
3.11 Modelação de uma esfera a impactar um alvo com uma única camada de tecido (a)vista de lado, (b)vista de cima, (c)vista de baixo com as fibras principais sob tensão[24] 21
3.12 Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e através da simulação numérica na parte frontal do prato (cima) e na parte traseira (baixo)[71] 21
3.13 Velocidade do projétil em relação ao tempo (esquerda) e secção reta no plano médio do alvo correspondente aos pontos A, B e C (direita) [63] 22
3.14 Distribuição do critério de rutura de fibras de um alvo com 5 mm de espessura que sobre impacto a 250 m/s por parte de projéteis com diferentes formas[56] 23
3.15 Modelação do projétil mostrando o núcleo em chumbo e o invólucro em cobre[19] 23
3.16 Propagação de dano em painéis com diferentes dimensões[15] 24
3.17 Representação estrutural de um material em diferentes escalas [77] 25
3.18 Representação esquemática do modelo original (esquerda) e o modelo macroscópico (direita) [76] 25

3.19 Representação esquemática do modelo original (esquerda) e o modelo mesoscópico (direita) [76] 26
3.20 Representação esquemática da rutura das fibras, quebra da matriz e delaminagem [38] 26
3.21 Evolução da delaminagem no alvo no decorrer do impacto no modelo uniforme (esquerda) e no modelo por camadas (direita) [76] 27
3.22 Deformação da malha a acompanhar a deformação do painel no instante t e no instante t+Δt [22] 28
3.23 Condição inicial da simulação numérica [71] 29
3.24 Evolução da velocidade do projétil ao longo do tempo para modelo mesoscópico e macroscópico para diversas velocidades de impacto [41] 30

5.1 Modelação de um projétil de diâmetro 8 mm 38
5.2 Modelação de um painel de dimensões 100×100 mm com uma partição de 40×40 mm 39
5.3 Instante inicial do impacto de um projétil de aço num alvo em Kevlar®/resina de epóxido 45
5.4 Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo em Kevlar® e resina epoxídica [76] 46
5.5 Área danificada num alvo em Kevlar®/resina de epóxido em função da velocidade de impacto 47
5.6 Instante inicial do impacto por parte de um projétil de aço num laminado CFRP . 49
5.7 Velocidade residual em função da velocidade de impacto do projétil, com um ângulo de impacto igual a 0°, num alvo em carbono/resina epoxídica[54] 49
5.8 Área danificada na primeira camada de um alvo em fibra de carbono após colisão com um projétil de diâmetro 7.5 mm a 160 m/s 50
5.9 Área danificada de um alvo em fibra de carbono em função da velocidade de impacto de um projétil em aço, de diâmetro 7.5 mm, com um ângulo de inclinação igual a 0° [54] 50
5.10 Situação particular do instante inicial para o impacto em laminados CFRP por parte de um projétil em aço a uma velocidade de 90 m/s num ângulo de 45° . . . 51
5.11 Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil, com um ângulo de impacto igual a 45°, num alvo em carbono/resina de epóxido [54] . . . 52
5.12 Área danificada num alvo em fibra de carbono após colisão num ângulo de 45° de um projétil de diâmetro 7.5 mm a 90 m/s (camada 10) 52
5.13 Área danificada de um alvo em fibra de carbono em função da velocidade de impacto de um projétil em aço, de diâmetro 7.5 mm, a 45° [54] 53
5.14 Instante inicial do impacto de um projétil de aço num alvo em Kevlar®em matriz PVB 54
5.15 Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto num alvo em Kevlar®/PVB de espessura igual a 5 mm[56] 55
5.16 Área danificada num alvo em Kevlar®/PVB de espessura 5 mm após colisão com um projétil de diâmetro 7.62 mm a 271.25 m/s (terceira camada) 56
5.17 Área danificada num alvo em Kevlar®/PVB de espessura 5 mm em função da velocidade de impacto do projétil [56] 56
5.18 Velocidade residual em função da velocidade de impacto do projétil num alvo em Kevlar®/PVB de espessura igual a 10 mm[56] 57
5.19 Área danificada num alvo em Kevlar®/PVB, de espessura 10 mm, após colisão a 500 m/s com um projétil de diâmetro 7.5 mm (camada 18) 58

5.20 Área danificada num alvo em Kevlar®/PVB, de espessura 10 mm em função da velocidade de impacto do projétil 58
5.21 Instante inicial do impacto de um projétil de 12.7 mm de diâmetro com alvos de UHMWPE com espessuras variáveis 60
5.22 Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 9.8 mm[63] 61
5.23 Área danificada na sexta camada de um alvo em UHMWPE após colidir com um projétil de diâmetro 12.7 mm a uma velocidade de 1000 m/s 61
5.24 Área danificada de um alvo em UHMWPE (espessura 9.8 mm) em função da velocidade de impacto do projétil 62
5.25 Velocidade residual em função da velocidade de impacto do projétil num alvo de UHMWPE de espessura igual a 50.4 mm [63] 62
5.27 Área danificada de um alvo em UHMWPE com espessura 50.4 mm em função da velocidade de impacto 63
5.26 Área danificada, na camada 31, de um alvo em UHMWPE com espessura 50.4 mm após sofrer colisão a uma velocidade de 1800 m/s por parte de um projétil de diâmetro 12.7 mm 63
5.28 Instante inicial do impacto em alvos em UHMWPE de espessura variável por parte de um projétil de diâmetro 20 mm 64
5.29 Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 10 mm[63] 64
5.31 Área danificada de um alvo em UHMWPE (espessura 10 mm) em função da velocidade de impacto do projétil 65
5.30 Área danificada na terceira camada de um alvo em UHMWPE de espessura 10 mm após sofrer impacto por parte de um projétil a 700 m/s 65
5.32 Velocidade residual do projétil em função da sua velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 76 mm[63] 66
5.33 Área danificada num alvo de 76 mm de espessura em UHMWPE após sofrer colisão por parte de um projétil à velocidade limite balístico obtida experimentalmente (camada 14) 66
5.34 Área danificada de um alvo em UHMWPE com 76 mm de espessura em função da velocidade de impacto 67
5.35 Instante inicial do impacto de um projétil em cobre num alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura variável 68
5.36 Velocidade residual do projétil em função do ângulo de impacto num alvo em E-glass/resina de epóxido [19] 69
5.37 Área danificada na décima segunda camada de um alvo em fibra de vidro (espessura 3 mm) após colisão num ângulo de 60° de um projétil com diâmetro 8 mm a uma velocidade de 415 m/s 70
5.38 Área danificada num alvo em E-Glass/resina de epóxido em função do ângulo de impacto do projétil 71
5.39 Instante inicial do impacto de um projétil em aço num alvo também em aço . . . 73
5.40 Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil em aço num alvo em Weldox 460 E [13] 73
5.41 Área danificada num alvo de Weldox 460 E, espessura 12 mm, após sofrer colisão por parte de um projétil em aço a uma velocidade de 452 m/s 74
5.42 Instante inicial do impacto de um projétil em aço endurecido num alvo em Weldox 700 E 75

5.43 Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil num painel monolítico de espessura 6 mm em Weldox 700 E [33] 76
5.44 Área danificada de um alvo em Weldox 700 E (espessura 6 mm) após sofrer impacto a 160 m/s por parte de um projétil em aço endurecido de diâmetro 20 mm . 76
5.45 Instante inicial do impacto num alvo em alumínio 1100-H12 com espessuras variáveis entre 0.5 e 1 mm 78
5.46 Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil num alvo em alumínio 1100-H12 de espessura 0.5 mm [40] 79
5.47 Área danificada num alvo de espessura 0.5 mm em alumínio 1100-H12 após sofrer impacto por parte de um projétil a 112.43 m/s 79
5.48 Instante inicial do impacto de um projétil em aço num alvo em carboneto de boro e Kevlar® 81
5.49 Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto num alvo em carboneto de boro/Kevlar® [70] 82
5.50 Área danificada de um alvo em carboneto de boro/Kevlar® após sofrer colisão de um projétil em aço a 350 m/s (camada 2) 83
5.51 Área danificada num alvo em carboneto de boro/Kevlar® em função da velocidade de impacto de um projétil em aço 83
5.52 Instante inicial do impacto de um projétil em tungsténio num alvo em alumina 99.5% e Twaron® 86
5.53 Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto após colisão com um alvo em alumina 99.5% e Twaron® [36] 87
5.54 Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/Twaron® após sofrer colisão de um projétil em tungsténio a 445 m/s (camada 27) 87
5.55 Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/Twaron® em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio 88
5.56 Instante inicial do impacto de um projétil em tungsténio num alvo em alumina e alumínio 90
5.57 Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto após colidir com um alvo em alumina/alumínio, de espessura 10 mm [25] 91
5.58 Área danificada, na camada de alumínio, de um alvo de espessura total 10 mm, após sofrer colisão por parte de um projétil a 250 m/s 92
5.59 Área danificada de um alvo,e espessura total 10 mm, em função da velocidade de impacto de um projétil 92

6.1 Instante inicial do impacto de um projétil de diâmetro 12.7 mm num alvo em IM7-8552 97
6.2 Velocidade residual dos projéteis em função da velocidade de impacto após colidir com um alvo em IM7-8552 97
6.3 Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm a uma velocidade de 600 m/s (camada 4) 98
6.4 Área danificada num alvo em IM7-8552 em função da velocidade de impacto dos projéteis em aço 98
6.5 Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão a 600 m/s por parte de um projétil de 20 mm num ângulo de 30° (camada 7) 99
6.6 Velocidade residual de diferentes projéteis em aço em função da sua velocidade de impacto após colidir com um alvo em IM7-8552 num ângulo de 30° 99
6.7 Área danificada de um alvo em IM7-8552 em função da velocidade de impacto de projéteis que colidem com o mesmo num ângulo de 30° 100

6.8 Velocidade residual em função da velocidade de impacto dos diferentes projéteis em aço após colisão com um alvo em IM7-8552/alumínio 103
6.9 Área danificada, na camada de alumínio, após sofrer colisão de um projétil, de diâmetro 12.7 mm, a 400 m/s 104
6.10 Área danificada em função da velocidade de impacto dos diferentes projéteis em aço após colisão com um alvo em IM7-8552/alumínio 104
6.11 Velocidade residual de projéteis em aço, de diferentes diâmetros, em função da velocidade de impacto num alvo em carboneto de silício/IM7-8552 (espessura do cerâmico 15mm) 106
6.12 Área danificada na décima camada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 após sofrer colisão a 900 m/s de um projétil em aço 106
6.13 Área danificada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 em função da velocidade de impacto de projéteis em aço com diferentes dimensões 107
6.14 Velocidade residual em função da velocidade de impacto dos diferentes projéteis após colidirem com um alvo em SiC+IM7-8552+Al 108
6.15 Área danificada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio após sofrer colisão a 900 m/s por parte de um projétil de diâmetro 20 mm (camada 11) 109
6.16 Área danificada em função da velocidade de impacto dos diferentes projéteis após colidirem com um alvo em carboneto de silício,IM7-8552 e alumínio 110

1 Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 19.6 mm [63] 121
2 Área danificada de um alvo em UHMWPE (espessura 19.6 mm) após colisão com um projétil de diâmetro 12.7 mm a uma velocidade de 902 m/s (camada 14) . . . 121
3 Área danificada num alvo em UHMWPE de espessura 19.6 mm em função da velocidade de impacto do projétil 122
4 Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 25.2 mm [63] 122
5 Área danificada da décima camada de um alvo de 25.2 mm de espessura em UHMWPE após colisão a 1500 m/s de um projétil de diâmetro 12.7 mm 123
6 Área danificada de um alvo em UHMWPE (espessura 25.2 mm) em função da velocidade de impacto 123
7 Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 35 mm [63] 124
8 Área danificada na camada 21 de um alvo de espessura 35 mm em UHMWPE após sofrer impacto de um projétil de diâmetro 12.7 mm a 1250 m/s 124
9 Área danificada em função da velocidade de impacto num alvo de 35 mm de espessura em UHMWPE 125
10 Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 20 mm [63] 125
11 Área danificada num alvo em UHMWPE, com espessura 20 mm, após sofrer colisão por parte de um projétil a 1000 m/s (camada 6) 126
12 Área danificada num alvo em UHMWPE, com espessura 20 mm, em função da velocidade de impacto 126
13 Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 36 mm [63] 127
14 Área danificada num alvo de espessura 36 mm em UHMWPE após colisão com um projétil à velocidade limite balístico obtida experimentalmente (camada 18) . 127

15 Área danificada em função da velocidade de impacto, num alvo em UHMWPE de espessura 36 mm 128
16 Área danificada na nona camada de um alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura 3 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre a 415 m/s 128
17 Área danificada de um alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura 3 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre num ângulo de 30° (camada 11) 129
18 Área danificada na quinta camada de um alvo em E-Glass/resina epoxídica de espessura 3 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre num ângulo de 45° . 129
19 Área danificada na décima camada de um alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura 5 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre a uma velocidade de 415 m/s 130
20 Área danificada na primeira camada de um alvo em E-Glass/resina epoxídica de espessura 5 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre num ângulo de 30° . 130
21 Área danificada de um alvo em E-Glass/resina epoxídica de espessura 5 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre num ângulo de 45° (camada 6) 131
22 Área danificada de um alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura 7 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre a uma velocidade de 415 m/s num ângulo de 0° (camada 20) 131
23 Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil após colisão com um alvo monolítico de 12 mm de espessura em Weldox 700 E [33] . . . 132
24 Área danificada de um alvo monolítico de espessura 12 mm em Weldox 700 E após sofrer colisão de um projétil em aço endurecido a uma velocidade de 175 m/s 132
25 Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil após colisão com um alvo em Weldox 700 E de duas camadas com 6 mm de espessura cada [33] 133
26 Área danificada de um alvo de duas camadas em Weldox 700 E após sofrer colisão de um projétil em aço endurecido a uma velocidade de 350 m/s 133
27 Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil num alvo de espessura 0.71 mm em alumínio 1100-H12 [40] 134
28 Área danificada de um alvo de espessura 0.71 mm em alumínio 1100-H12 após sofrer colisão de um projétil com velocidade igual a 115.312 m/s 134
29 Velocidade residual de um projétil em função da velocidade de impacto após colisão com um alvo em alumínio 1100-H12 de espessura igual a 1 mm [40] 135
30 Área danificada num alvo de espessura 1 mm, em alumínio 1100-H12, após sofrer colisão por parte de um projétil a 108.131 m/s 135
31 Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio num alvo em alumina/alumínio de espessura 20 mm [25] 136
32 Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/alumínio 5083-H116, de espessura 20 mm, após sofrer colisão de um projétil em tungsténio a 445 m/s (camada de alumínio) 136
33 Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/alumínio 5083-H116 em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio (espessura 20 mm) [25] . 137
34 Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio num alvo em alumina/alumínio de espessura 30 mm [25] 137
35 Área danificada de um alvo, de espessura 30 mm, em alumina 99.5%/alumínio 5083-H116, após sofrer colisão de um projétil em tungsténio a 550 m/s (camada de alumínio) 138

36 Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/alumínio 5083-H116 (espessura 30 mm), em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio [25] . 138
37 Instante inicial do impacto de um projétil de diâmetro 7.62 mm num alvo em IM7-8552 139
38 Instante inicial do impacto de um projétil de diâmetro 20 mm num alvo em IM7-8552 139
39 Área danificada da primeira camada de um alvo de IM7-8552 após sofrer colisão a 100 m/s por parte de um projétil de diâmetro 12.7 mm 140
40 Área danificada da quarta camada de um alvo de IM7-8552 após sofrer colisão a 600 m/s por parte de um projétil de diâmetro 20 mm 140
41 Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão a 900 m/s por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm num ângulo de 30° (camada 3) 141
42 Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão a 200 m/s por parte de um projétil de 12.7 mm de diâmetro num ângulo de 30° (camada 13) 141
43 Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão a 200 m/s por parte de um projétil de 12.7 mm de diâmetro num ângulo de 30° (camada 13) 142
44 Área danificada na camada 11 de um alvo em IM7-8552 e alumínio quando sofre impacto de um projétil, de diâmetro 12.7 mm, a 400 m/s 142
45 Área danificada na camada de alumínio num alvo em IM7-8552/alumínio quando sofre impacto de um projétil, de diâmetro 7.62 mm, com uma velocidade igual a 600 m/s 143
46 Área danificada na terceira camada de um alvo em IM7-8552/alumínio quando sofre impacto de um projétil, de diâmetro 7.62 mm, com uma velocidade igual a 600 m/s 143
47 Área danificada num alvo em IM7-8552/alumínio quando sofre impacto de um projétil, de diâmetro 20 mm, a uma velocidade de 900 m/s (camada 14) 144
48 Área danificada na sexta camada de um alvo em IM7-8552/alumínio quando sofre colisão por parte de um projétil, de diâmetro 20 mm, com velocidade 900 m/s . . 144
49 Área danificada na terceira camada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 após colisão por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm a 400 m/s (espessura 15 mm) 145
50 Área danificada na sexta camada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552, com 15 mm de espessura, após colisão por parte de um projétil de diâmetro 12.7 mm a 600 m/s 145
51 Velocidade residual de um projétil em função da velocidade de impacto deste num alvo de espessura 10 mm em carboneto de silício e IM7-8552 146
52 Área danificada na sexta camada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552, de espessura 10 mm, após colisão por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm a 600 m/s 146
53 Área danificada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 após colisão por parte de um projétil de diâmetro 12.7 mm a 900 m/s (camada 12) 147
54 Área danificada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 após colisão por parte de um projétil de diâmetro 20 mm a 400 m/s (camada 11) 147
55 Área danificada de um alvo, de espessura 10 mm, em carboneto de silício e IM7-8552 em função da velocidade de impacto de diferentes projéteis 148
56 Área danificada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio após sofrer impacto por parte de um projétil de diâmetro 20 mm com uma velocidade de 900 m/s (última camada) 148

57 Área danificada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio após sofrer impacto por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm com uma velocidade de 600 m/s (camada 8) 149
58 Área danificada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio após colisão com um projétil de diâmetro 7.62 mm a uma velocidade de 600 m/s (camada de alumínio) 149
59 Área danificada na oitava camada de um alvo em SiC, IM7-8552 e Al após sofrer impacto de um projétil de 12.7 mm a uma velocidade de 400 m/s 150
60 Área danificada na última camada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio, após sofrer impacto de um projétil de 12.7 mm a uma velocidade de 400 m/s 150

Lista de Tabelas

2.1 Classificação da velocidade de impacto[29] 8

5.1 Propriedades do projétil em aço 4340 [76] 45
5.2 Propriedades do alvo de Kevlar® em matriz de resina epoxídica[76, 14] 46
5.3 Propriedades do projétil em aço [54] 48
5.4 Propriedades do alvo em fibra AS-4 e matriz de resina epoxídica 8552 [54, 14] . 48
5.5 Propriedades do projétil em aço 4340[56] 54
5.6 Propriedades do alvo de Kevlar® em matriz PVB[56] 55
5.7 Propriedades mecânicas do projétil em aço 4340[63] 59
5.8 Propriedades mecânicas do compósito Dyneema HB26 utilizado no alvo[63] . . . 60
5.9 Propriedades do invólucro do projétil em cobre [19] 67
5.10 Propriedades do núcleo do projétil em chumbo [19] 68
5.11 Propriedades do alvo de fibra de vidro E-Glass em matriz de resina epoxídica [19] 69
5.12 Propriedades do alvo em aço Weldox 460 E [13] 72
5.13 Propriedades do alvo em aço Weldox 700 E [33] 74
5.14 Propriedades do aço endurecido utilizado para o fabrico do projétil [33] 75
5.15 Propriedades do alvo em alumínio 1100-H12 [40] 77
5.16 Propriedades do projétil em aço [70] 80
5.17 Propriedades do compósito Kevlar-49®/resina de epóxido [70, 14] 81
5.18 Propriedades do carboneto de boro (JH-2) [48, 44, 32] 82
5.19 Propriedades do compósito Twaron [36] 84
5.20 Propriedades da alumina 99.5% [36, 32] 85
5.21 Propriedades do tungsténio utilizado para o fabrico do projétil [36] 86
5.22 Propriedades do projétil em tungsténio [36, 25] 88
5.23 Propriedades da alumina 99.5% [25, 36, 32] 89
5.24 Propriedades do alumínio 5083-H116 [32, 25] 90

6.1 Propriedades mecânicas do compósito IM7-8552 [23, 14] 96
6.2 Massa total do alvo em IM7-8552 sujeito ao impacto por parte dos três projéteis distintos 96
6.3 Propriedades projétil em aço [54] 96
6.4 Propriedades do alvo em alumínio 1100-H12 [40] 101
6.5 Propriedades do carboneto de silício (JH-2) [73] 102
6.6 Massas das diferentes configurações IM7-8552 com material dúctil estudadas . . 103
6.7 Massa total das diferentes configurações de alvos em material cerâmico com IM7-8552 estudadas 105
6.8 Massas das diferentes configurações estudadas que envolvem os três tipos de materiais 108

LISTA DE TABELAS

Abreviaturas e Símbolos

CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FRP	Fabric Reinforced Polymer
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
JC	Johnson-Cook
JHB	Johnson-Holmquist-Beissel
JH-2	Johnson-Holmquist 2
MEF	Método dos Elementos Finitos
PVB	Polivinyl butyral
RVE	Representative volume elements
UMEC	Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas

A	Tensão de cedência do material (JC) [MPa]
A	Coeficiente da tensão intacta (JH-2)
B	Parâmetro de encruamento (JC) [MPa]
B	Coeficiente da tensão fraturada (JH-2)
C	Constante da taxa de deformação (JC)
C	Coeficiente da taxa de deformação (JH-2)
D_1 a D_5	Constantes do modelo de rutura (JC)
D_1	Coeficiente de dano (JH-2)
D_2	Expoente de dano (JH-2)
E	Módulo de Young [GPa]
E_1	Módulo de elasticidade na direção das fibras [MPa]
E_2	Módulo de elasticidade na direção transversal às fibras [MPa]
G	Módulo de rigidez [MPa]
K^1	Módulo elástico de volume (JH-2) [MPa]
K^2	Coeficiente para o termo de 2° grau na equação de estado (JH-2) [MPa]
K^3	Coeficiente para o termo de 3° grau na equação de estado (JH-2) [MPa]
m	Constante de amaciamento (JC)
M	Expoente da tensão fraturada (JH-2)
n	Expoente do parâmetro de encruamento (JC)
N	Expoente da tensão intacta (JH-2)
P	Pressão real (JH-2) [MPa]
P_{HEL}	Pressão no limite elástico de Hugoniot (JH-2) [MPa]
P^*	Pressão normalizada (JH-2) [MPa]
S_l	Limite de resistência ao corte longitudinal [MPa]
S_t	Limite de resistência ao corte transversal [MPa]

t	Tempo [s]
T	Pressão máxima à tração (JH-2) [MPa]
T_{melt}	Temperatura de fusão (JC) [K]
T_0	Temperatura de transição (JC) [K]
T^*	Temperatura homóloga (JC) [K]
T^*	Pressão máxima à tração normalizada (JH-2) [MPa]
V_0	Velocidade limite balístico [m/s]
V_{50}	Velocidade limite balístico [m/s]
V_i	Velocidade de impacto [m/s]
V_r	Velocidade residual [m/s]
X_c	Limite de resistência longitudinal de compressão [MPa]
X_t	Limite de resistência longitudinal de tração [MPa]
Y_c	Limite de resistência transversal de compressão [MPa]
Y_t	Limite de resistência transversal de tração [MPa]
β	Fator de volume (JH-2)
Δt	Intervalo de tempo [s]
$\Delta\varepsilon$	Incremento da deformação plástica equivalente (JC)
ε	Deformação plástica equivalente (JC)
ε^f	Deformação de rutura equivalente(JC)
ε_f^{max}	Deformação equivalente máxima na fratura para o caso de pressão constante
ε_f^{min}	Deformação equivalente mínima na fratura para o caso de pressão constante
$\dot{\varepsilon_0}$	Taxa de deformação de referência (JC) e (JH-2) [s^{-1}]
$\dot{\varepsilon^*}$	Taxa adimensional de deformação plástica (JC)
θ	Ângulo de incidência do projétil [graus]
ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Massa específica [kg/m^3]
ρ_0	Massa específica inicial (JH-2) [kg/m^3]
σ	Tensão equivalente (JH-2) [MPa]
σ_{max}^f	Tensão após rutura máxima (JH-2) [MPa]
σ_{HEL}	Tensão limite elástico de Hugoniot (JH-2) [MPa]
σ_{max}^i	Tensão intacta máxima (JH-2) [MPa]
σ^*	Tensão normalizada equivalente (JH-2) [MPa]
σ_f^*	Tensão após rutura equivalente normalizada (JH-2) [MPa]
σ_i^*	Tensão intacta equivalente normalizada(JH-2) [MPa]

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Este trabalho foi desenvolvido na Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas, UMEC, do INEGI. O instituto aposta no investimento em projetos relacionados com o desenvolvimento de materiais compósitos para aplicações estruturais, entre as quais a proteção balística tem ganho importância. Projetos como o PASSARO e o ALIR_mcs enquadram-se nos referidos desenvolvimentos na área da balística, estudando as tecnologias que dizem respeito à proteção face ao impacto de pássaros, granizo, esferas de metal e relâmpagos [27].

1.2 Motivação

Os materiais compósitos de matriz polimérica são cada vez mais utilizados em infraestruturas aeronáuticas que suportam cargas de pressão. De entre todos os requisitos, a estrutura que suporta a carga tem que manter a sua integridade estrutural mesmo sofrendo danos provenientes de impactos a alta velocidade. O tipo de fibra, resina, sequência de empilhamento, espessura do espécimen, velocidade e tipo do projétil são parâmetros que afetam o modo de rutura dos compósitos, sendo motivos de análise em projetos do INEGI como o PASSARO e o ALIR_mcs [1].

Este tipo de preocupações é parte da motivação inerente da realização deste trabalho, onde é necessário fazer uma rápida avaliação da resistência do material ao impacto, de modo a avaliar se é vantajoso prosseguir para uma análise mais aprofundada ou descartar de imediato esse material.

Dado que os ensaios experimentais de impactos balísticos são ensaios dispendiosos, torna-se relevante possuir uma ferramenta que permite prever o comportamento dos materiais em análise. É neste contexto que surge a aplicação da modelação numérica no estudo de painéis balísticos. Contudo, é importante ressalvar que todos os resultados obtidos através de simulação numérica devem ser validados recorrendo a testes experimentais antes da sua utilização em aplicações práticas.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho passa pelo estudo da resposta do material compósito IM7-8552 ao impacto balístico.

Numa primeira fase, pretende-se propor um modelo exemplificativo do fenómeno de impacto, utilizando elementos de casca, de modo a reduzir o tempo de computação. O objetivo deste tipo de implementação é a possibilidade de efetuar uma rápida avaliação do fenómeno de impacto. Assim é possível ter um melhor conhecimento da resposta do material em estudo, algo que se pode mostrar útil na tomada de decisão de prosseguir para uma análise mais aprofundada do mesmo.

A validação deste modelo para materiais compósitos, dúcteis e cerâmicos será efetuada recorrendo à literatura. Mediante os resultados obtidos, prosseguir-se-á para a investigação do comportamento do IM7-8552 face ao impacto balístico. Pretende-se efetuar uma análise de diversas configurações envolvendo este material, de modo a avaliar qual a melhor solução de proteção.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em sete capítulos.

O primeiro capítulo, denominado de Introdução, contém o âmbito do projeto, quais as motivações por detrás do mesmo e o objetivo que se propõe atingir.

No segundo capítulo faz-se uma contextualização histórica da proteção pessoal e são apresentados alguns conceitos básicos para auxiliar na compreensão das temáticas tratadas. Por último, são referidos quais os materiais tipicamente utilizados em aplicações balísticas, assim como os requisitos que os mesmos têm que preencher para que possam ser utilizados para este fim.

No capítulo 3 é apresentado o estado da arte relativo à análise do comportamento dos materiais quando sujeitos a impacto balístico. Este capítulo está dividido em três secções que correspondem aos tipos de análise possíveis: análise energética, análise experimental e análise numérica.

No capítulo 4 são descritos os materiais utilizados no decorrer do trabalho, sendo também mencionadas algumas das suas aplicações atuais.

O quinto capítulo apresenta uma descrição acerca do Método dos Elementos Finitos e do software utilizado para executar as simulações numéricas. São apresentadas as considerações iniciais e condições de fronteira do problema. São descritos os modelos de dano utilizados para cada tipo de material estudado. De seguida, são apresentados os resultados referentes à validação do modelo numérico para os diferentes materiais testados, sendo estes discutidos na última secção desse capítulo.

No capítulo 6 é descrito o material de base analisado, assim como as suas propriedades. É também apresentada uma proposta de hibridização na tentativa de melhoria do desempenho balístico do material. A última secção deste capítulo apresenta uma reflexão crítica acerca dos resultados obtidos.

O último capítulo é dedicado às conclusões retiradas deste trabalho e sugere algumas propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Introdução à proteção balística pessoal

2.1 Contextualização histórica

Ao longo da história da humanidade, a ocorrência de conflitos tem sido uma constante. Assim sendo, o ser humano não deixou de procurar melhorar a sua proteção contra os seus inimigos [67].

Na época pré-histórica, o recurso a peles de animais, madeira ou fibras naturais era suficiente para garantir a proteção do Homem face aos perigos que enfrentava. No entanto, os tempos foram evoluindo e foram começando a ser utilizados outros tipos de materiais, tendo também que ser adaptados os mecanismos de proteção pessoal [55].

Na Grécia Antiga, foram desenvolvidos capacetes de proteção em bronze e uma armadura, no mesmo material. Para além disso, os gregos ainda carregavam um grande escudo redondo que usavam para se defender. A superioridade técnica dos gregos apenas foi destronada pela capacidade de organização dos romanos [69]. A legião romana para além da sua organização exímia, apoderou-se das armas utilizadas pelos outros povos selecionando apenas as mais eficazes. Utilizavam cota de malha para se protegerem, juntamente com uma couraça articulada em três partes. O legionário romano fazia-se acompanhar ainda de um capacete e do escudo para assegurar a sua proteção, como se pode verificar na figura 2.1 [37].



Figura 2.1: Legionário romano com armamento pesado (século III a.C) [4]

A figura 2.2 representa o tipo de armadura utilizada na Idade Média. Neste período, a infantaria deixa de ser tão importante, dando mais destaque à cavalaria, passando a ser confecionada armadura não só para os homens como para os animais. No entanto, com o aparecimento das armas de fogo no século XV, toda a organização tática tem que ser repensada, assim como os mecanismos de proteção pessoal, tornando a armadura obsoleta [2, 6].

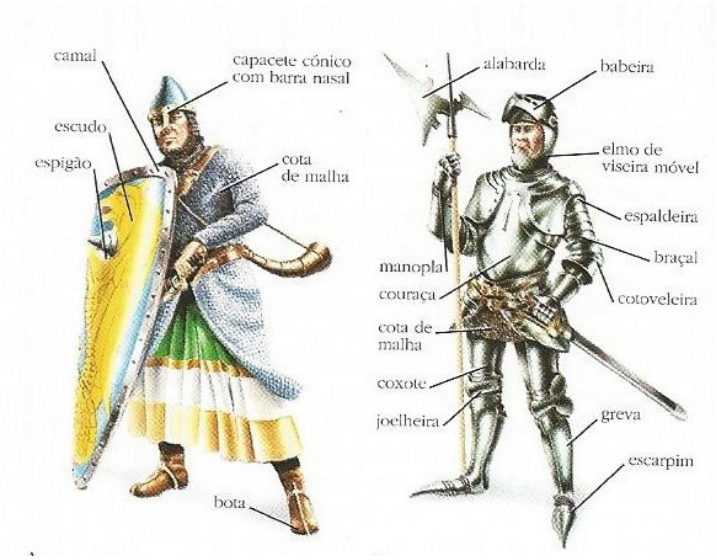


Figura 2.2: Armaduras do século XII (esquerda) e do século XIV (direita) [5]

Em 1915, plena Primeira Guerra Mundial, ambas as frentes que combatiam estabilizaram e os soldados encontravam-se em trincheiras que percorriam os campos de batalha. Nesta situação, a única parte do seu corpo que se encontrava exposta era a cabeça. Assim sendo, o desenvolvimento das proteções concentrou-se num objeto específico, o capacete [55, 8]. Por esta altura, foi desenvolvida nos Estados Unidos da América uma armadura de aço que incluía uma proteção para a cabeça. Contudo, esta foi rapidamente descartada, uma vez que o seu elevado peso não permitia a completa mobilidade do seu utilizador [31].

Desenvolveram-se placas em aço que permitiam a proteção do abdómen, costas ou peito dos soldados durante a Segunda Guerra Mundial. No entanto estas não foram aproveitados pelos soldados de infantaria devido ao seu elevado peso [29].

No decorrer do século XX, novos materiais começaram a aparecer e, consequentemente, a ser utilizados na indústria militar. O Nylon®foi um desses materiais que, combinado com outros, passou a ser utilizado no fabrico de coletes, pois permitia uma boa resistência com um peso reduzido [43, 3, 49].

Na década de 70, a empresa DuPont desenvolveu o Kevlar®, uma fibra de aramida fina, robusta e muito resistente ao fogo e à corrosão [7]. O seu baixo peso e durabilidade, aliados ao facto de ser extremamente resistente e ter uma grande capacidade de absorção de energia, fazem com que seja uma excelente opção a utilizar nas proteções balísticas [9].

Nos dias de hoje, esta constante tentativa de proteger ao máximo o ser humano apresenta-se de extrema importância não só no cenário de guerra moderno, mas também no de guerrilha urbana [50]. Por esta razão é que o Kevlar®, apesar de se apresentar como uma boa opção para calibres inferiores, não é totalmente eficaz para maiores níveis de ameaça. Deste modo, começa a ser frequente a adição de insertos cerâmicos que permitem a dissipação de grande parte da energia do projétil aquando do impacto, assegurando uma maior proteção do utilizador [29, 53]. A empresa holandesa DSM desenvolveu uma fibra, nome comercial, Dyneema®, a partir de um polietileno de muito alto peso molecular que se apresenta, atualmente, como um dos líderes mundiais em materiais de proteção e fibras de elevado desempenho. É utilizado em capacetes, coletes, escudos e insertos capazes de protegerem o Homem contra uma grande variedade de ameaças. Pode ser ainda utilizado na proteção de veículos, não só terrenos, como também aéreos e náuticos [10].

2.2 Conceitos básicos sobre proteção balística

O tema desta dissertação envolve a compreensão de alguns conceitos específicos. Esses conceitos são aqui apresentados para que fiquem claros todos os aspetos que serão posteriormente mencionados.

2.2.1 Projétil

O projétil é um dos quatro elementos constituintes da munição e encontra-se representado com o número (1) na figura que segue. Os restantes constituintes são o invólucro, caixa ou estojo representado pelo número (2), a escorva, cápsula ou fulminante, definida por (3) e, por fim, a carga, (4) [67].

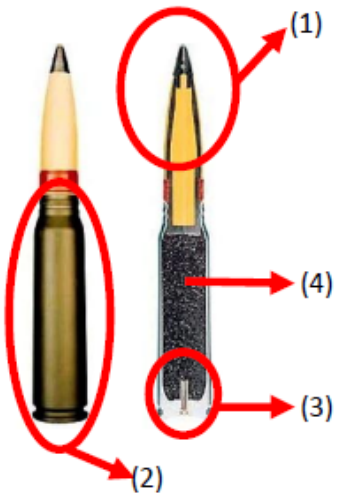


Figura 2.3: Munição [67]

O projétil é o componente essencial da munição e é este que desempenha a função mais exigente. Dado que o projétil é o único constituinte da munição que passa pelo cano da arma e atinge o alvo, é ele o responsável por provocar os efeitos desejados no mesmo [55]. É, portanto, importante, que o projétil apresente um determinado conjunto de características que o permitem executar, de forma bem sucedida, a sua função. Para facilitar a aquisição de uma grande quantidade de energia, o projétil deve ter uma densidade elevada. Deve também ser capaz de suportar o atrito da alma da arma sem que se funda e deve ser deformável de acordo com o seu destino, vulnerante [1] ou derrubante [2] [67].

Quanto à sua geometria, os projéteis dividem-se em três zonas. A parte superior do projétil fica fora do invólucro e é denominada ponta. O corpo, cilíndrico, é serrilhado para aumentar a fixação do projétil ao invólucro. Por último a base, situada no interior do invólucro, é a parte inferior do projétil e encontra-se sujeita à ação dos gases resultantes da combustão da pólvora. Quanto à forma podem ser pontiagudos, cilindros ogivais e bi-ogivais. A figura 2.4 apresenta alguns exemplos daquelas que podem ser as geometrias dos projéteis. De modo a que se consigam obter trajetórias aceitáveis para todas as distâncias, o peso dos projéteis de armas ligeiras varia entre as 9 e as 13g [55].



Figura 2.4: Diferentes geometrias de projéteis [55]

No que diz respeito à composição química, existem três regiões fundamentais: a coifa, a camisa e o núcleo, representadas na figura 2.5. A primeira é em chumbo e tem como objetivo auxiliar a penetração do núcleo. Existe apenas em munições perfurantes. De seguida, com espessura suficiente para evitar a fusão do núcleo, vem a camisa. Em cobre ou numa liga de cobre e níquel, a camisa é pouco dura para não deteriorar as estrias da arma. Por fim, temos o núcleo, que pode ser de chumbo, bronze ou aço. Normalmente, por razões de peso e custo, é utilizado o primeiro, ligado com estanho ou antimónio, para uma maior dureza [67].

[1] **Poder vulnerante (que vulnera, fere):** corresponde à capacidade de um projétil de trespassar o alvo no momento do impacto. Quanto mais for a penetração, maior é o poder vulnerante [55]

[2] **Poder derrubante:** capacidade do projétil de neutralizar um atacante não atingindo um órgão vital [55]

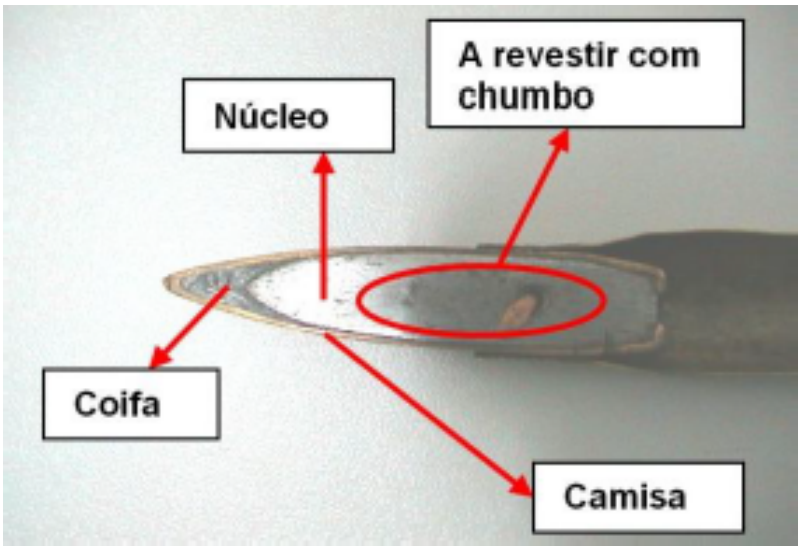


Figura 2.5: Três regiões distintas do projétil, representado em corte transversal [67]

2.2.2 Painel balístico

Um painel cuja finalidade é resistir a impactos de alta velocidade é denominado painel balístico. Estes painéis são constituídos por múltiplas camadas de tecidos resistentes ao impacto e são colocados nos lados do corpo de modo a permitir uma maior proteção para o tronco e órgãos vitais [29, 17]. No entanto, a utilização destes painéis não está limitada apenas à proteção humana, podendo ser também aplicada à proteção de veículos em terra, ar ou água [10].

O desempenho destes painéis depende das diferentes propriedades dos tecidos, como, por exemplo, das propriedades das fibras, a sua orientação e densidade, do número de camadas, e da própria bala, no que diz respeito ao seu diâmetro, forma e velocidade [68].

No fabrico destes painéis são utilizados materiais de elevada tenacidade, pois são capazes de absorver maiores níveis de energia de deformação e dissipam mais energia no processo de danificação [30].

2.2.3 Impacto balístico

Podemos dividir as solicitações de impacto em três categorias diferentes: baixa velocidade, alta velocidade e hipervelocidade. Esta classificação deve-se aos vários fenómenos de transferência de energia que ocorrem entre o projétil e o alvo. A velocidade inicial do primeiro varia, devido à absorção e dissipação de energia cinética por parte do alvo através de diferentes formas de deformação ou mecanismos de propagação de dano [66].

Nos impactos a baixa velocidade, a resposta da estrutura à penetração do projétil é de carácter global, sendo verificadas deformações numa maior área do alvo. Dado o carácter global da resposta da estrutura, as condições de fronteira do alvo são cruciais para a análise, uma

Tabela 2.1: Classificação da velocidade de impacto[29]

Velocidade	Classificação
Até 250 m/s	Baixa velocidade
500 a 2000 m/s	Alta velocidade
>2000 m/s	Hipervelocidade

vez que as ondas de tensão geradas no ponto de impacto têm tempo de viajar até aos limites do painel[29, 28, 61].

Relativamente aos impactos de alta velocidade, o período de contacto entre o projétil e o alvo é muito inferior ao menor período vibracional da estrutura. Temos assim uma solicitação transitória sendo a resposta de carácter localizado, podendo existir ou não perfuração total. Isto é, a resposta da estrutura depende apenas do comportamento do material na vizinhança da zona na qual ocorreu o impacto, sendo que as condições de fronteira do alvo não interferem na sua resposta. É de extrema importância a análise da propagação das ondas de tensão, pois, caso não ocorra perfuração, são os efeitos devidos à mesma que devem ser tidos em conta [30, 66, 61].

Já os impactos de hipervelocidade podem ser divididos em duas categorias, a dos impactos entre 2000 a 3000 m/s e a dos impactos a velocidades muito elevadas, superiores a 12000 m/s. Os alvos atingidos a velocidades que se inserem na primeira categoria, têm um comportamento de resposta típico dos fluidos, pois ocorrem no material tensões locais com um valor várias vezes superior ao da resistência dos materiais. Relativamente aos impactos que se inserem na segunda categoria, ocorre vaporização do alvo no momento de impacto do projétil[29, 28].

Geralmente, os impactos balísticos são impactos de alta velocidade por um projétil de baixa massa contra um alvo [66].

2.2.4 Limite balístico

Existem várias definições para o conceito de limite balístico.

A primeira corresponde à velocidade máxima do projétil quando ocorre perfuração total do alvo, sendo a velocidade de saída do projétil nula, V_0 [66].

Quando existe uma probabilidade de 50% do projétil perfurar o alvo, temos a segunda definição de limite balístico do par projétil-alvo, V_{50} [57].

2.3 Materiais tipicamente utilizados em aplicações balísticas

A mobilidade das pessoas e veículos que necessitam de proteção balística corresponde a um dos maiores desafios aquando do fabrico dos equipamentos de proteção. Assim sendo, cada vez mais são necessários materiais com um rácio resistência-peso bastante elevado [53, 26].

Deste modo, os tecidos feitos de material leve e fibras de elevada resistência e rigidez são cada vez mais utilizados numa grande gama de aplicações de proteção balística, tanto pessoal, como de veículos, pois apresentam uma melhor relação resistência-peso comparativamente aos

metais [19, 58]. Os compósitos laminados que incorporam fibras de elevado desempenho em matrizes de resina constituem excelentes reforços que são frequentemente utilizados em aplicações balísticas [57, 62].

2.3.1 Fibras de aramida

As fibras de aramida, ou fibras aramídicas são produzidas a partir de poliamidas aromáticas. Foram comercializadas pela primeira vez em 1972 nos Estados Unidos da América pela empresa DuPont® [30, 34].

Apresentam uma cor amarelada e são produzidas mantendo a solução de polímero a uma baixa temperatura, sendo posteriormente extrudidas a uma temperatura muito mais elevada, de cerca de 200°C. Este método faz com que a cadeia molecular seja alinhada, produzindo assim melhores propriedades mecânicas [30, 38].

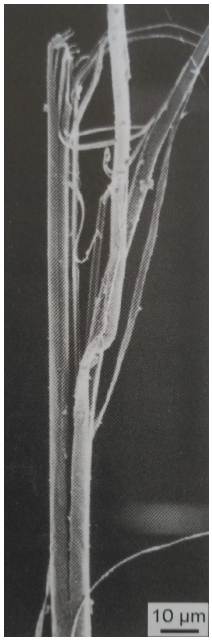


Figura 2.6: Fibra de Kevlar® [34]

Estas fibras, representadas na figura 2.6, apresentam uma grande estabilidade térmica e também um módulo específico elevado. As moléculas desta família de polímeros são muito rígidas, logo estas fibras apresentam uma boa resistência mecânica e também química. Têm uma ótima relação rigidez-peso e uma boa resistência à fadiga e ao impacto, o que as torna excelentes para aplicações balísticas. Possuem um bom comportamento no amortecimento de vibrações, boas características isoladoras e elevada resistência a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes, para além de uma boa resistência a ácidos e alcalis [30, 34].

A baixa resistência à flexão e à compressão e uma elevada sensibilidade ao corte interlaminar, constituem algumas das desvantagens da utilização destas fibras. Estas desvantagens são atribuídas à fraca ligação entre a matriz e as fibras, no entanto, foram desenvolvidos diversos tratamentos

superficiais para melhorar a ligação interfacial e, consequentemente, a resistência à delaminagem [30].

2.3.2 Polietileno de muito alto peso molecular (UHMWPE)

O polietileno de muito alto peso molecular, ou UHWMPE, apresenta-se como sendo um dos materiais líderes em fibras de alto desempenho. As fibras fabricadas com este material, de nomes comerciais Dyneema®e Spectra®, podem ser utilizadas num variadíssimo número de aplicações de proteção, como coletes, capacetes e proteção de veículos. É uma das mais fortes e leves fibras fabricadas pelo homem, o que permite um máximo conforto e flexibilidade, explicando assim o interesse da sua aplicação em balística, como é o caso dos capacetes representados na figura 2.7.



Figura 2.7: Capacetes balísticos fabricados em Dyneema® [10]

Ambos os materiais são capazes de aguentar elevadas cargas a grandes velocidades e possuem também uma grande resistência a químicos, água e luz ultravioleta, sendo ainda 40% mais resistentes que as fibras de aramida [10, 11].

2.3.3 Cerâmicos

Apesar das excelentes características apresentadas pelas fibras de aramida e pelo polietileno de muito alvo peso molecular, contra armas de fogo de maior calibre, estes materiais não se apresentam como sendo perfeitamente capazes de assegurar uma total proteção balística. Assim sendo, começa a aparecer a necessidade de materiais que possuam uma maior dureza, maior resistência à compressão, baixa densidade e uma elevada resistência à fratura. Dadas as características apresentadas, foi proposta a utilização de insertos cerâmicos aliada aos painéis balísticos fabricados em materiais compósitos [53].

No momento do impacto, os materiais cerâmicos causam a erosão do projétil, o que leva a que este dissipe energia, sendo os materiais compósitos responsáveis por absorver a energia cinética residual necessária para parar o projétil.

Na figura 2.8 encontra-se representado um exemplo dum painel balístico com quatro camadas: camada cerâmica, primeira, segunda e terceira camadas. Os materiais cerâmicos permitem

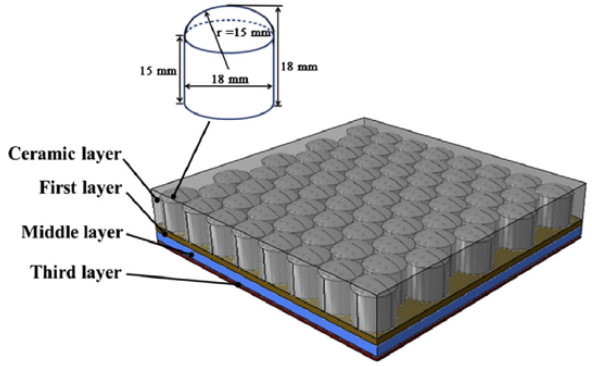


Figura 2.8: Diagrama esquemático de um painel balístico com materiais cerâmicos e compósitos [53]

a dissipação de cerca de 60% da energia cinética do projétil, permitindo, deste modo, aos materiais compósitos localizados na parte posterior do painel a capacidade de deter projéteis de maior calibre [53].

Capítulo 3

Estado da arte

3.1 Análise do impacto balístico

A análise do impacto balístico possui dificuldade elevada devido ao número de parâmetros intervenientes. Essa dificuldade é acrescida quando existem materiais compósitos envolvidos, devido à sua anisotropia, a uma maior variedade de critérios de rutura e incertezas relativamente às leis constituintes [71].

Existem três cenários possíveis no impacto balístico: o projétil perfura o alvo e tem uma velocidade de saída não nula, o projétil perfura parcialmente o alvo sendo ricocheteado ou imobilizado por este ou, por último, o projétil perfura o alvo completamente, saindo com uma velocidade nula. No primeiro caso, a energia cinética inicial do projétil é muito superior à energia que o alvo consegue absorver ou dissipar, acontecendo o contrário no segundo caso. No terceiro caso, toda a energia possuída pelo projétil é transferida para o alvo, sendo exatamente igual à energia que o próprio alvo consegue absorver ou dissipar [66].

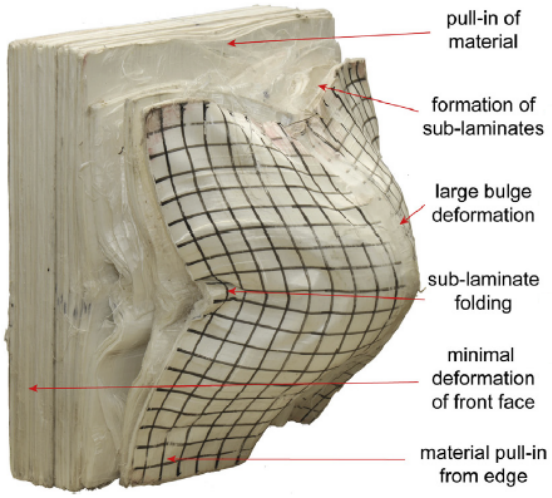


Figura 3.1: Alvo com 102 mm de espessura que sofreu impacto por parte de um projétil com velocidade inferior ao limite balístico [63]

Quando o projétil embate no alvo, a sua energia cinética é absorvida e dissipada por este de diversas formas. A absorção de energia por parte do alvo, origina a formação de um cone na parte posterior do mesmo, sendo este um dos principais mecanismos de absorção presentes no fenómeno de impacto [61]. A formação deste cone deve-se à propagação da onda transversa, que tem origem no ponto de impacto e se propaga em direção ao exterior [59].

No momento de impacto do projétil no alvo, este é comprimido ao longo da sua espessura. Esta compressão cria uma onda de tensão, sujeitando o alvo a tensões de corte na zona do ponto de impacto do projétil. Com o aumento da força de contacto, aumentam também as tensões de corte. Ao atingir a tensão limite de corte, as fibras acabam por ceder à penetração do projétil, sendo arrancadas. A este fenómeno dá-se o nome de *shear plugging*, tendo também este um papel importante na absorção de energia no impacto balístico [29, 61].

Para além dos anteriormente mencionados, a rutura das fibras primárias, a deformação das fibras secundárias, a fissuração da matriz, a delaminagem e, ainda, a energia friccional absorvida durante a perfuração são também, todos eles, fenómenos de dissipação de energia que ocorrem em situações de impacto [61]. É portanto necessário perceber e quantificar a energia absorvida por cada um destes diferentes mecanismos [59]. Consoante o material em questão, os mecanismos de absorção de energia variam, podendo ainda ser influenciados pela arquitetura dos reforços utilizados [66].

As fibras em que o projétil embate diretamente são denominadas fibras primárias e são traccionadas até à sua rutura. As fibras secundárias não são diretamente atingidas pelo projétil, mas sofrem deformação devido à formação do cone. Na figura 3.2 é possível observar uma representação esquemática das fibras primárias e secundárias. No entanto, esta deformação apresenta apenas danos permanentes nas zonas de entrada e saída do projétil [59]. A rutura das fibras é considerada frágil, ou seja, ocorre instantaneamente e em direções de rutura específicas [71].

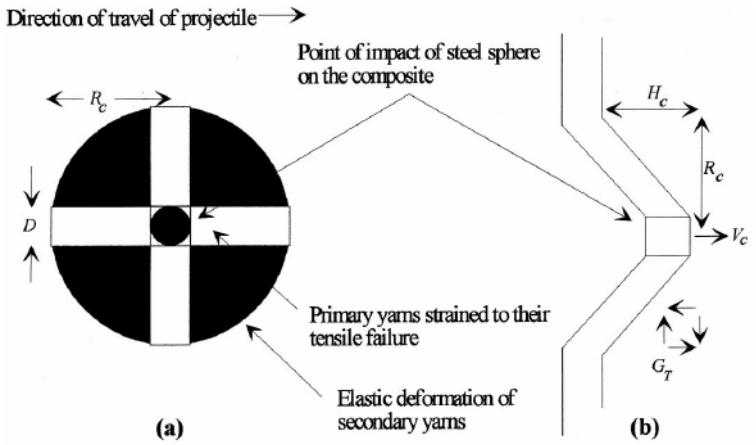


Figura 3.2: Identificação das fibras primárias e secundárias num compósito (a) Cone de deformação (b) [59]

O desempenho balístico dos compósitos depende das características mecânicas dos reforços e

das matrizes, dependendo ainda das características físicas do projétil e do alvo. Por características mecânicas do alvo entenda-se o módulo de Young, a tensão limite elástico, a tensão de rutura e a configuração do laminado. Relativamente às características físicas, a espessura e as dimensões do alvo são as características relevantes para a análise do impacto balístico. No que diz respeito ao projétil, as características a ter em conta são a sua massa, forma e propriedades mecânicas do material constituinte [61].

Como já foi visto anteriormente, nos impactos balísticos a resposta é de carácter localizado, sendo os seus efeitos apenas notáveis na proximidade dos pontos de entrada e saída. Isto leva-nos a concluir que as condições de fronteira têm um efeito desprezável no modo de rutura do alvo. Contudo, esta alteração das condições de fronteira leva a que os mecanismos através dos quais ocorre absorção de energia e de deformação do alvo sofram mudanças significativas [16, 61].

Existem vários métodos de análise quando estudamos o impacto balístico. Pode ser feita uma análise energética, uma análise experimental ou ainda uma análise recorrendo ao Método dos Elementos Finitos.

3.1.1 Análise energética

A análise energética é feita recorrendo a modelos analíticos baseados na teoria de ondas e no equilíbrio energético que resulta da diferença entre a energia cinética do projétil e a energia absorvida pelo alvo através de diferentes mecanismos[60].

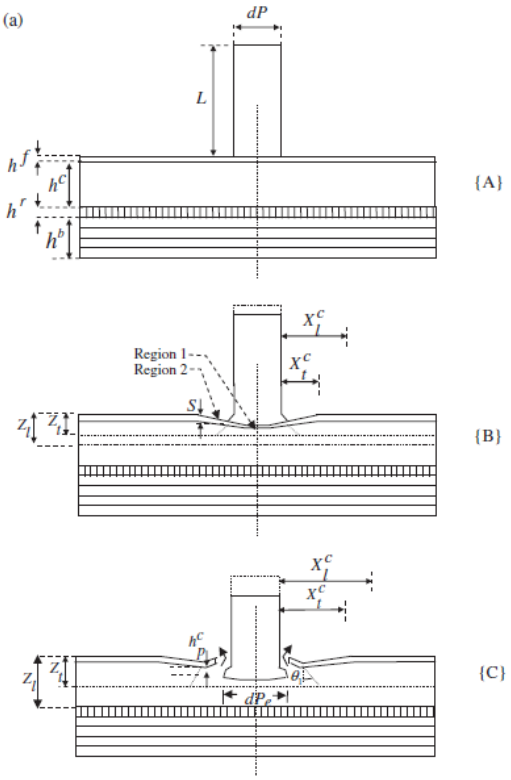


Figura 3.3: Fases de penetração de um projétil cilíndrico num painel [60]

Consoante o material constituinte do alvo, os mecanismos de dano presentes variam, tornando a análise complexa. Deste modo são desenvolvidos modelos analíticos que assumem os fenómenos físicos de iniciação e propagação do dano predominantes, representando de uma forma simplificada os mecanismos presentes no processo de penetração, não comprometendo a validade do modelo. São ainda feitas simplificações no que diz respeito ao projétil e ao seu comportamento no momento do impacto. A caracterização do material é feita determinando um reduzido número de parâmetros recorrendo a testes experimentais[66, 75].

Com estes modelos simplificados, conseguimos obter bons resultados de velocidade e massa residuais, assim como o histórico de velocidade do projétil e da deflexão ou deformação do material atingido. Somos ainda capazes de saber qual a quantidade de energia absorvida por cada um dos diferentes mecanismos presentes. Assim, a totalidade da energia absorvida no impacto é calculada somando todas as energias individuais absorvidas. Os mecanismos de absorção de energias possíveis de representar recorrendo a modelos analíticos são a formação de um cone na parte posterior do alvo (ver figura 3.4), deformação das fibras secundárias, rutura das fibras primárias, delaminagem, rutura da matriz, *shear plugging* e fricção entre o projétil e o alvo[61, 75].

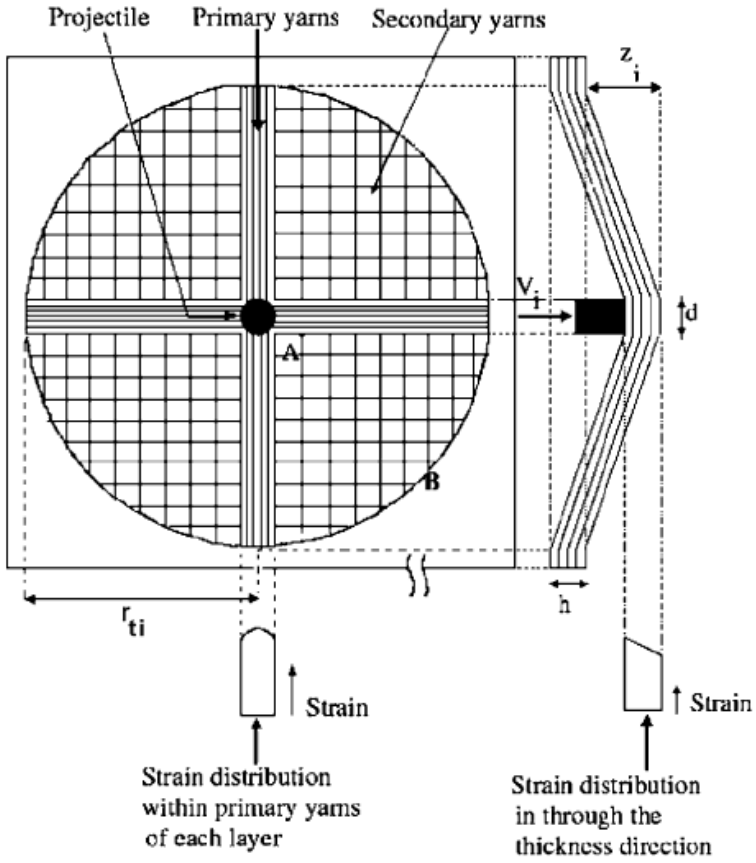


Figura 3.4: Formação do cone na parte posterior do alvo no momento do impacto [61]

Esta abordagem apresenta como principal vantagem a possibilidade de obter uma solução em

poucos segundos num computador pessoal, o que se traduz numa análise de diferentes sistemas projétil-alvo num curto espaço de tempo. Como desvantagem temos a reduzida precisão quando comparada com resultados obtidos através de simulação numérica[18, 61].

3.1.2 Ensaios experimentais

A primeira fase dos ensaios experimentais passa pelo fabrico dos provetes, que dependem dos materiais utilizados e devem reproduzir a proteção balística.

A montagem dos ensaios pode ser feita de diversas formas, no entanto existem normas que regulam os mesmos, para que tudo possa decorrer em segurança. Geralmente, recorre-se a câmaras de vídeo de alta velocidade que permitem observar o fenómeno pré e pós impacto, como se encontra representado no esquema da seguinte figura[62].

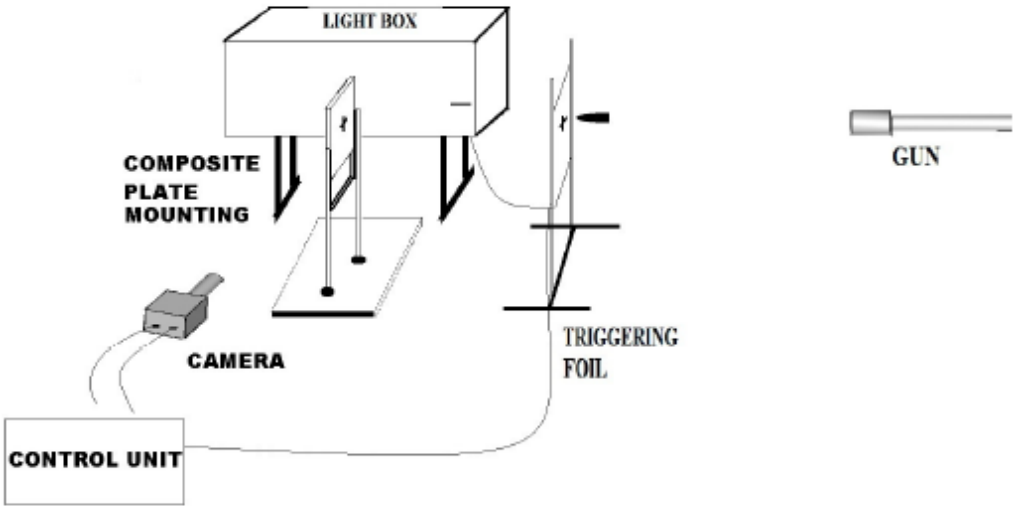


Figura 3.5: Montagem de um ensaio de impacto balístico [62]

Uma fonte de luz artificial que usa lâmpadas de flash para iluminação encontra-se sincronizada com a câmara que é acionada quando é rompida uma folha de alumínio que se encontra a uma distância previamente definida consoante a velocidade do projétil. As fotografias tiradas pela máquina são guardadas num computador e posteriormente analisadas *frame* a *frame* para estudar a resposta ao impacto dos laminados. É também possível efetuar o cálculo da velocidade de impacto e da velocidade residual [62]. Ainda recorrendo a uma câmara de alta velocidade, existem outros tipos de montagem. Um outro exemplo recorre à utilização de duas câmaras, uma apontada para a parte frontal do painel e a segunda câmara para a parte posterior. Assim, é possível analisar os dados obtidos por uma e por outra conseguindo avaliar se estes coincidem ou não. Com a utilização destas câmaras é possível determinar o raio da região deformada após o impacto do projétil [59].



Figura 3.6: Diagrama esquemático de uma montagem típica de ensaios balísticos [53]

Este tipo de montagem acaba por possuir algumas limitações, pois pode dar-se o caso de não ser possível capturar o *frame* exato em que ocorre a rutura, sendo mais provável capturar fotografias anteriores e posteriores a esse evento. Se ocorrer esta situação, o raio de deformação a ser utilizado no cálculo do limite balístico terá que ser o valor superior correspondente ao *frame* seguinte. No entanto, esta montagem permite observar a propagação da onda transversa e o cone que se forma devido a esta, provando que a deformação é substancialmente homogénea em toda a espessura do compósito. Permite, ainda, a perceção de que a região deformada continua a crescer já depois do projétil ter atravessado o alvo, devido à energia cinética acumulada que vai ser transformada em energia elástica. O diâmetro final da região deformada é, aproximadamente, igual ao dobro do diâmetro no ponto de perfuração. Por fim, permite concluir que a velocidade de formação do cone é semelhante à velocidade do projétil que atravessa o alvo. O raio, profundidade e massa do cone, assim como a deformação nas fibras continuam a aumentar até que todas as fibras alcancem a rutura ou a totalidade da energia do projétil seja absorvida pelo alvo. A rutura das fibras dá-se de uma forma sequencial começando pelas fibras da camada superior e progredindo até à camada inferior, sendo que a deformação nas fibras primárias não é constante: é máxima no ponto de impacto e diminui à medida que se afasta deste [59, 61].

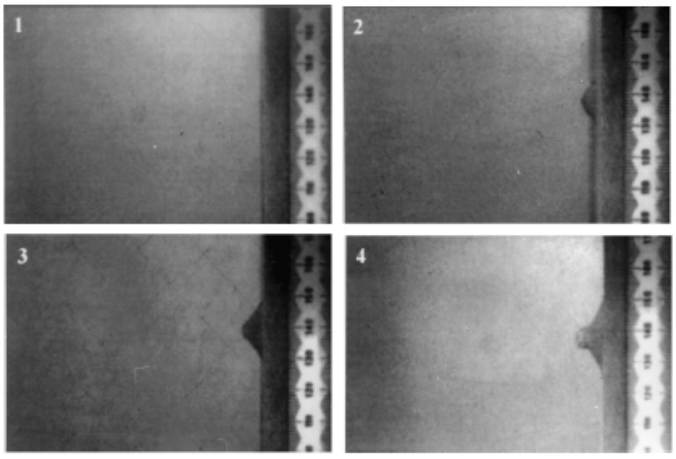


Figura 3.7: Formação do cone na parte posterior do painel compósito [59]

Os ensaios experimentais podem ter outros tipos de montagens recorrendo a dispositivos infravermelhos como opção às câmaras de alta velocidade previamente referidas, podendo também as suas considerações ser alteradas, como é o caso do ângulo de impacto. Fazer a alteração do ângulo de incidência do projétil no impacto também se apresenta como um bom desafio na determinação da resistência balística dos materiais. Para um determinado valor de espessura, a velocidade residual do projétil decresce gradualmente com o aumento do ângulo de inclinação, podendo ser completamente imobilizado, ou não, numa inclinação específica [19].

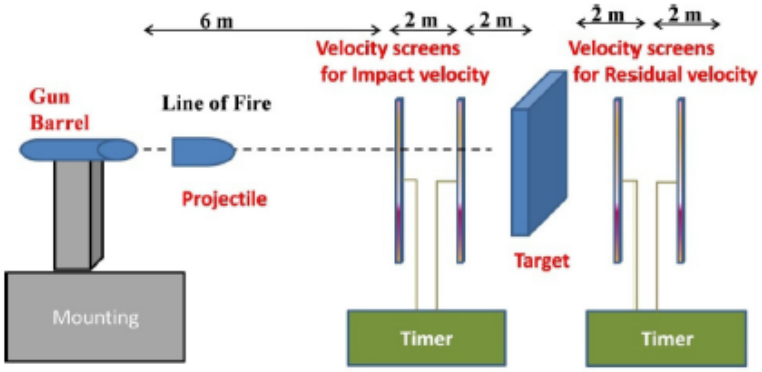


Figura 3.8: Exemplo de montagem utilizando dispositivos infravermelhos para efetuar a medição [19]

Com a realização de um ensaio experimental é evidente que quanto maior for a velocidade, mais rapidamente se completa o processo de penetração, sendo a zona afetada muito mais pequena, isto é, o dano é mais localizado. Um outro aspeto importante a ter em conta nos ensaios experimentais é o local de impacto do projétil, uma vez que o desempenho das fibras constituintes do painel é altamente dependente do mesmo. Consoante a localização do ponto de impacto, os mecanismos de rutura das fibras serão diferentes, sendo então evidentes as diferenças de desempenho. Um painel que sofre um impacto balístico no seu centro apresenta uma maior resistência do que um exatamente igual que sofre o mesmo impacto num dos quatro cantos, podendo mesmo o projétil conseguir perfurar o painel neste último caso, não tendo conseguido no anterior [26, 62].

O ângulo de incidência do projétil, assim como a forma do seu nariz é também um fator determinante para a penetração deste. Fazendo a análise de impacto de um projétil em amostras menos espessas, conseguimos calcular a espessura específica necessária para conseguir imobilizar o projétil, medindo a trajetória que este percorre no alvo, calculada de acordo com a seguinte equação[19, 56]:

$$trajetoria, x = \frac{t}{\cos(\theta)} \tag{3.1}$$

Pode ainda ocorrer a situação em que o alvo resiste à penetração do projétil, podendo ter velocidade residual nula ou negativa. Para o caso em que a velocidade residual é nula, sabemos que o alvo imobiliza o projétil, pois absorveu a totalidade da sua energia cinética. Concluímos

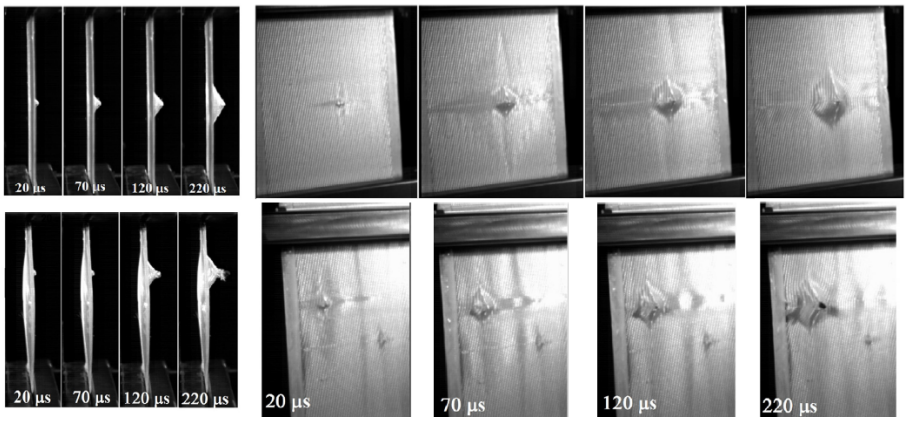


Figura 3.9: Comparação entre o impacto no centro e no canto do alvo em diferentes instantes [26]

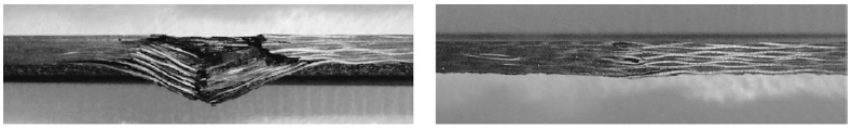


Figura 3.10: Secção reta de um laminado impactado por um projétil a 92 m/s com um ângulo de 0° (esquerda) e com um ângulo de 45° (direita) [54]

também que o valor da velocidade de impacto nesta situação corresponde ao limite balístico do par projétil-alvo em estudo. Quando obtemos uma velocidade residual negativa, trata-se da situação em que o projétil embate no alvo e sofre ricochete [71, 15].

Para além da desvantagem de serem ensaios com um custo elevado e serem, por norma, destrutivos, com os ensaios balísticos experimentais é difícil obter informação pormenorizada sobre o evento, como por exemplo, determinar os mecanismos microscópicos de absorção de energias, como é o caso da fissuração da matriz. É daqui que vem a necessidade da existência de novas formas de analisar os impactos de alta velocidade [29].

3.1.3 Simulação numérica

O impacto balístico é um evento complexo, governado por elevadas não linearidades e uma dependência de um enorme número de parâmetros, o que torna impossível obter uma solução analítica que caracterize o problema na sua totalidade [16]. No entanto, o desenho de painéis balísticos baseado em modelos físicos necessita de uma enorme quantidade de ensaios experimentais, que são bastante demorados e custosos [71]. Assim sendo, as simulações numéricas apresentam-se como uma excelente ferramenta na análise do comportamento dos materiais no estudo do impacto balístico.

Os modelos numéricos utilizados para prever o desempenho de elementos de proteção são também complexos, por isso, na sua grande maioria, são feitas simplificações para que o tratamento do problema se torne mais simples. Assim, é possível chegar a um compromisso de simplificação

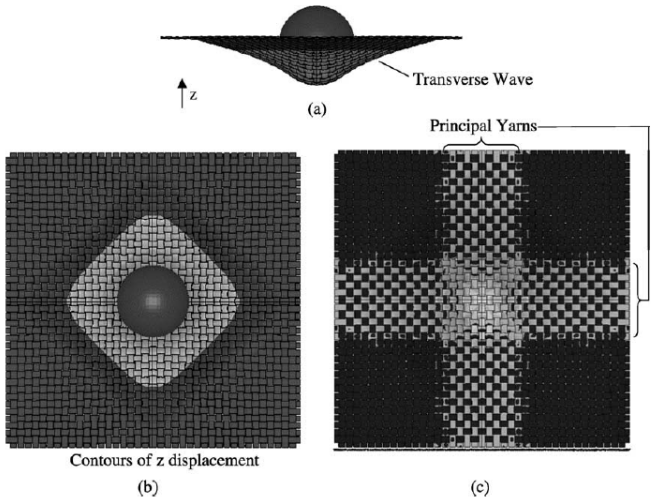


Figura 3.11: Modelação de uma esfera a impactar um alvo com uma única camada de tecido (a)vista de lado, (b)vista de cima, (c)vista de baixo com as fibras principais sob tensão[24]

sem comprometer os resultados obtidos [22]. Com o contínuo desenvolvimento de algoritmos numéricos e modelos materiais, a precisão das simulações numéricas tem vindo a aumentar e, por isso, a precisão e aplicação dos seus resultados tem sido cada vez maior [15].

Apesar da simulação numérica permitir que se evite a realização de testes experimentais, os resultados obtidos através desta devem ser sempre validados recorrendo à experimentação [71].

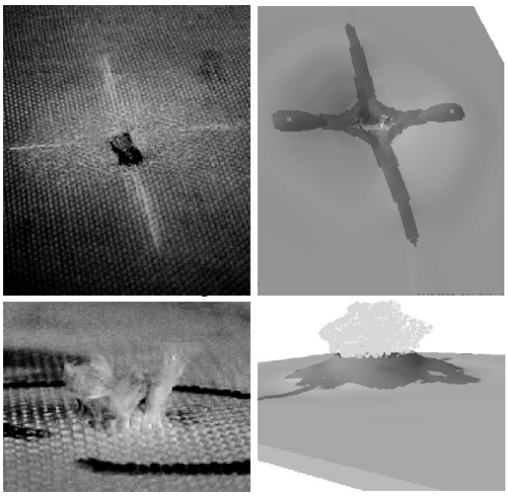


Figura 3.12: Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e através da simulação numérica na parte frontal do prato (cima) e na parte traseira (baixo)[71]

Com o recurso a simulações numéricas é possível estimar a velocidade residual do projétil, para além da velocidade limite de perfuração, e ainda os padrões de dano do compósito laminado ou de qualquer outro material que possa estar a ser estudado [19, 71, 59]. Através desses padrões verificados, é possível tirar conclusões acerca da rutura das fibras ou da matriz (dano intralaminar),

delaminagem (dano interlaminar), esmagamento de fibras e *shear plugging*[63, 15]. Para além de tudo isto, é possível determinar qual a quantidade de energia absorvida por cada um dos diferentes mecanismos de dano intervenientes e ainda o perfil de deslocamento do material do alvo[22].

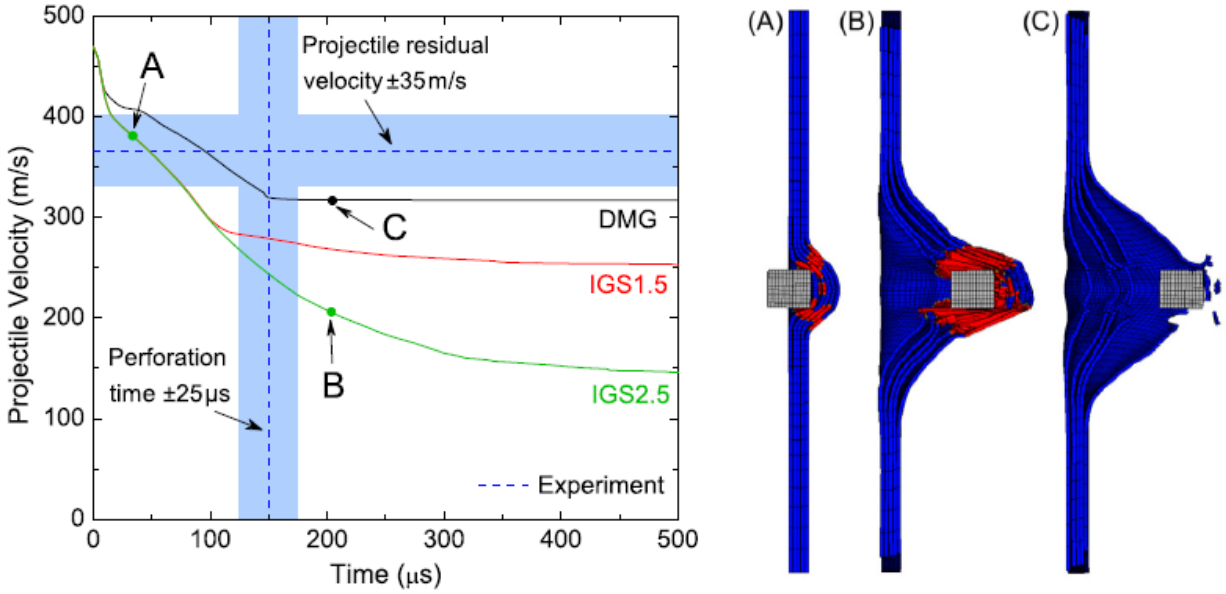


Figura 3.13: Velocidade do projétil em relação ao tempo (esquerda) e secção reta no plano médio do alvo correspondente aos pontos A, B e C (direita) [63]

Na modelação de ensaios de impacto é preciso ter em conta algumas considerações no que diz respeito ao projétil, ao alvo e às principais características de ambos. O projétil é muitas vezes modelado como sendo um corpo rígido utilizando elementos sólidos e mantém-se indeformável ao longo do impacto, ou seja, mantém a sua forma e massa após a colisão [59, 22]. Contudo, existem outras formas de modelação do projétil, como por exemplo a modelação feita em duas partes: um núcleo interior de aço e o invólucro exterior em chumbo. Nayak et. al [62] utilizaram o modelo de Johnson-Cook para descrever o comportamento elasto-plástico de ambos os constituintes do projétil. Alterando a forma, diâmetro ou velocidade de impacto do projétil obtemos diferentes resultados.

No processo de estudo da resposta de um alvo e dos materiais que o constituem, um dos parâmetros a sofrer alterações é a velocidade inicial do projétil [16]. Relativamente à forma do mesmo, sabe-se que o tipo de rutura que ocorre é primariamente dependente deste aspeto, principalmente em painéis metálicos. Isto acontece, pois a capacidade de absorção de energia do alvo está fortemente relacionada com a velocidade que o projétil possui antes de embater no alvo[56].

Tal como no caso do projétil, para o alvo é necessário ter em conta as características do material que o constitui, estas são vitais para uma maior precisão dos resultados da simulação. No caso de uma placa de aço, Banerjee et al. [16] modelaram o alvo como sendo um bloco de material visco-elástico que obedece à relação constituinte de Johnson-Cook. Ao considerar, por exemplo,

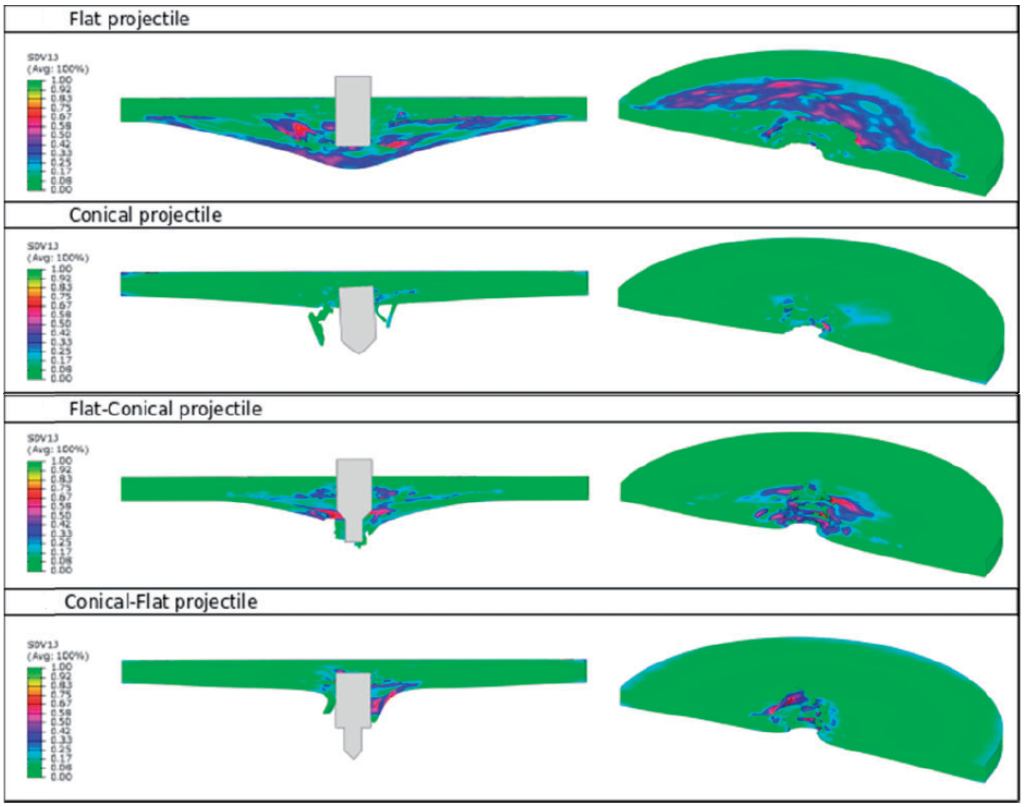


Figura 3.14: Distribuição do critério de rutura de fibras de um alvo com 5 mm de espessura que sobre impacto a 250 m/s por parte de projéteis com diferentes formas[56]

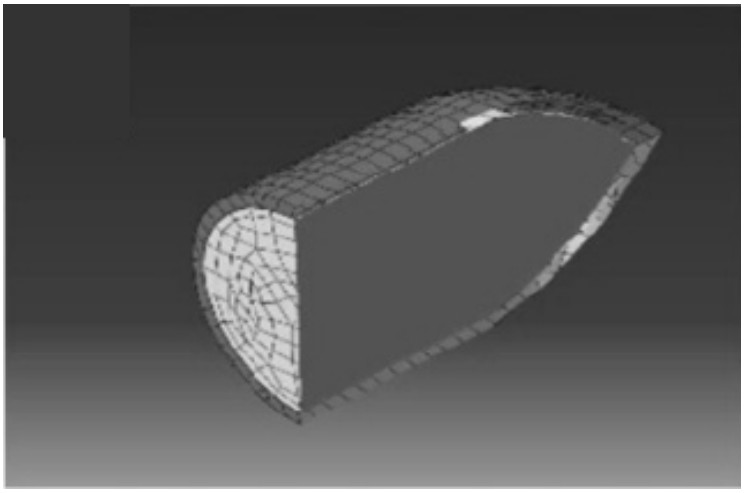


Figura 3.15: Modelação do projétil mostrando o núcleo em chumbo e o invólucro em cobre[19]

um compósito laminado, a análise pode ser feita recorrendo a critérios não-interativos, interativos ou parcialmente interativos. Os critérios não interativos não têm interatividade plena, ou seja, não têm em conta os efeitos combinados das diversas componentes do tensor das tensões. No entanto, estes critérios possibilitam uma identificação imediata do modo de rutura. São critérios deste tipo,

o critério da tensão máxima, que prevê que ocorra rutura no momento em que uma das componentes do tensor atinge a tensão de rutura correspondente. Existe também o critério de deformação máxima, semelhante ao anterior. Contudo, a rutura dá-se quando uma das deformações atinge o seu valor de rutura. Relativamente aos critérios interativos, sabemos que se exprimem através de polinómios do 2° grau. Um dos mais utilizados é o critério de Tsai-Hill, derivado do critério de Hill para a cedência plástica dos materiais, que por sua vez foi desenvolvido partindo do critério de cedência de von Mises para metais isotrópicos. No entanto, este critério possui inconsistências derivadas da sua formulação inicial, surge, por isso, o critério de Tsai-Wu que tem em conta a existência de diferentes resistências à tração e à compressão. Este critério apresenta-se já consistente com o comportamento real dos materiais compósitos. Para além destes, existem ainda os critérios parcialmente interativos, que pretendem atingir um compromisso entre a interatividade e a capacidade de identificar os modos de rutura. O critério de Hashin insere-se neste grupo e, no que diz respeito à rutura das fibras, é semelhante ao critério da tensão máxima. Um outro critério que faz parte deste grupo é o critério de Puck, que inclui ainda ruturas interfaciais ou das próprias fibras na análise da rutura transversal, também designada por rutura entre fibras[30].

A utilização de insertos cerâmicos em aplicações balísticas tem também vindo a ganhar importância, tendo Liu et al. [53] e também Feli et al. [36] proposto a sua modelação fazendo uso do critério de Johnson-Holmquist. Krishnan et al. [51] utilizam também este mesmo critério para modelar carboneto de boro silício. Já Fawaz et al. [35] utilizam um modelo elasto-plástico com formulação que combina endurecimento isotrópico e cinemático na modelação da alumina AD96.

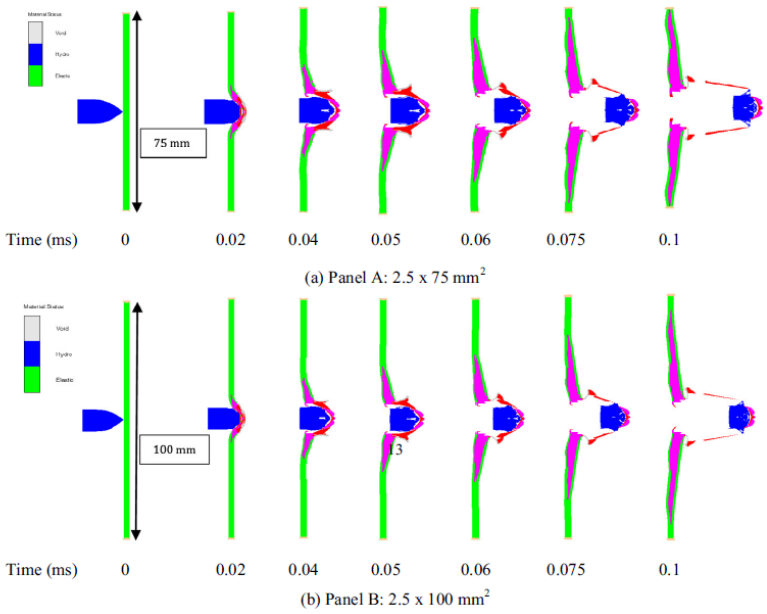


Figura 3.16: Propagação de dano em painéis com diferentes dimensões[15]

A abordagem feita numa análise numérica pode ser a três níveis: macroescala, mesoescala ou microescala.

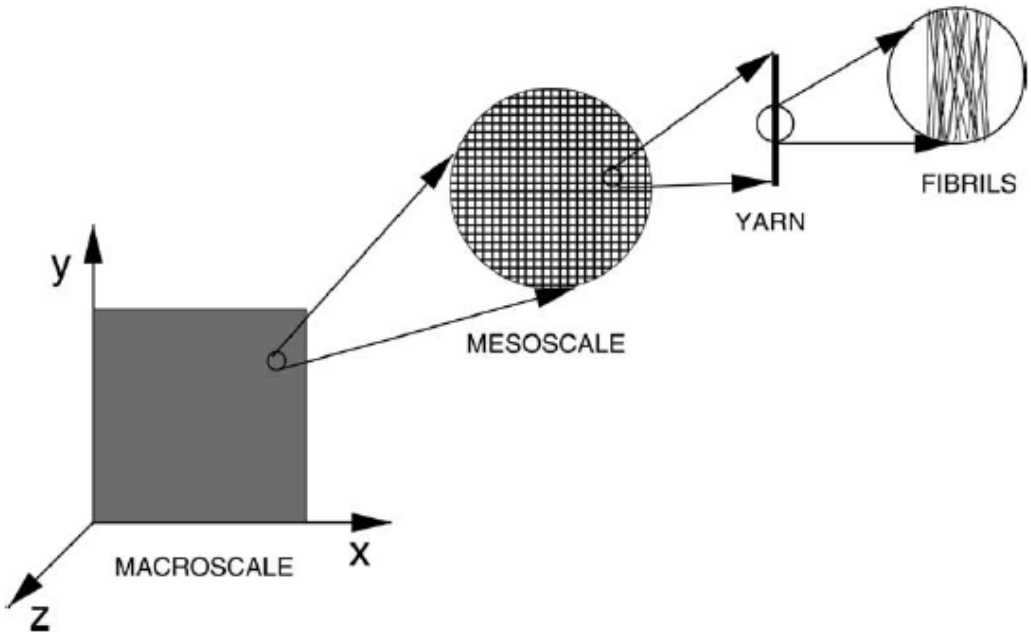


Figura 3.17: Representação estrutural de um material em diferentes escalas [77]

No modelo macroscópico não se considera a microestrutura específica de cada laminado, sendo este considerado equivalente a um material homogéneo. Os efeitos dos constituintes são representados por valores médios das propriedades do material compósito e o comportamento do material é descrito como se este fosse anisotrópico. Quando ocorre rutura, os mecanismos de falha da matriz e das fibras não são considerados isoladamente. Os laminados compósitos são vistos como um material homogéneo que contém uma matriz e fibras, ou seja, a rutura é descrita recorrendo a um modelo de macrorutura ortotrópico. O início da rutura é baseado em qualquer combinação de tensão ou deformação no material, sendo a rigidez e a resistência do material atualizadas com base na direção em que esta ocorre. Os modelos macroscópicos não permitem descrever deformações detalhadas de cada fibra, no entanto, permitem a redução do tempo de computação [77, 76, 41, 27].

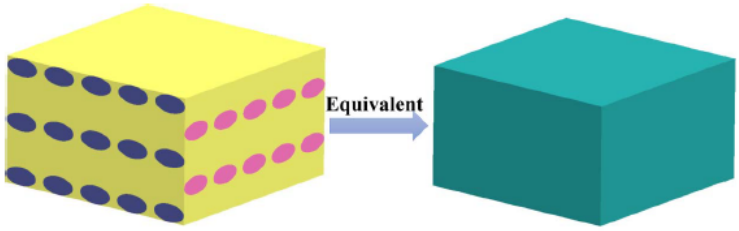


Figura 3.18: Representação esquemática do modelo original (esquerda) e o modelo macroscópico (direita) [76]

Na escala mesoscópica, a representação do alvo é feita à escala da camada. A camada é considerada como um material homogéneo com isotropia transversa para compósitos de fibras longas unidirecionais. A esta escala não se obtém qualquer informação acerca das interações entre os diferentes constituintes da camada. Para estruturas de grandes dimensões, este modelo é mais facilmente aplicável que o modelo microscópico e não exige tanto esforço computacional [76, 41, 27].

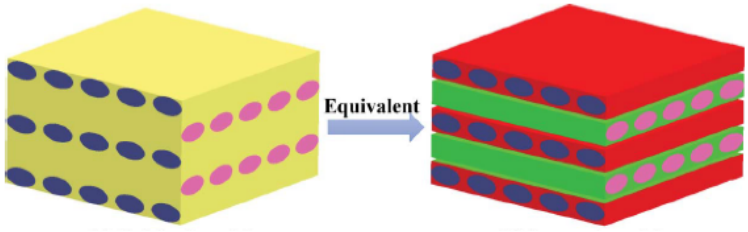


Figura 3.19: Representação esquemática do modelo original (esquerda) e o modelo mesoscópico (direita) [76]

O domínio da micromecânica exige uma análise ao nível dos constituintes da camada e tem o objetivo de prever as propriedades da mesma analisando as propriedades dos seus constituintes. Ambos os constituintes são visto como materiais individuais homogéneos e o principal foco desta abordagem é a interação entre eles e o comportamento resultante do compósito [30, 27].

A camada é constituída por uma matriz e uma enorme quantidade de fibras, assim esta abordagem tenta recorrer a modelos elementares que permitam representar o seu comportamento na totalidade. Já se conseguiu alcançar este objetivo nalguns casos sendo um exemplo o módulo de elasticidade na direção das fibras, E_1. No entanto, existem ainda bastantes dificuldades no desenvolvimento e aplicação de modelos rigorosos à microescala [30].

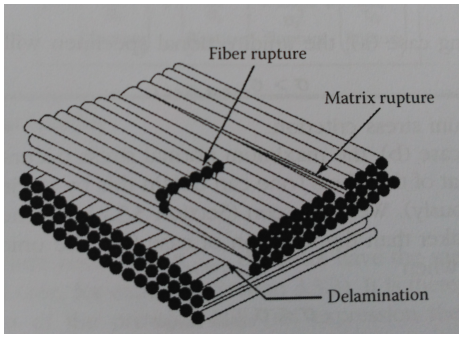


Figura 3.20: Representação esquemática da rutura das fibras, quebra da matriz e delaminagem [38]

Uma das maiores dificuldades é a incerteza acerca das propriedades dos constituintes. Por exemplo, as propriedades das fibras de carbono e de aramida são extremamente difíceis de medir, pois estas são fortemente anisotrópicas, no entanto, isto não se verifica para todos os casos. As propriedades na direção transversal são estimadas a partir de ensaios experimentais. Contudo, os

provetes utilizados nos ensaios para determinar as propriedades das resinas têm dimensões muito superiores à das camadas finas de matriz que envolvem as fibras, o que pode levar a que os valores obtidos não sejam exatos [30].

Cada uma das diversas abordagens necessita de diferentes tempos de computação, assim como nos permite chegar a diferentes conclusões. Com o aumento da escala, diminui o tempo de computação. No entanto, a previsão do comportamento do alvo utilizando um modelo em macroescala é menos realista que uma em mesoescala, apesar do primeiro ter um tempo de computação mais curto[41].

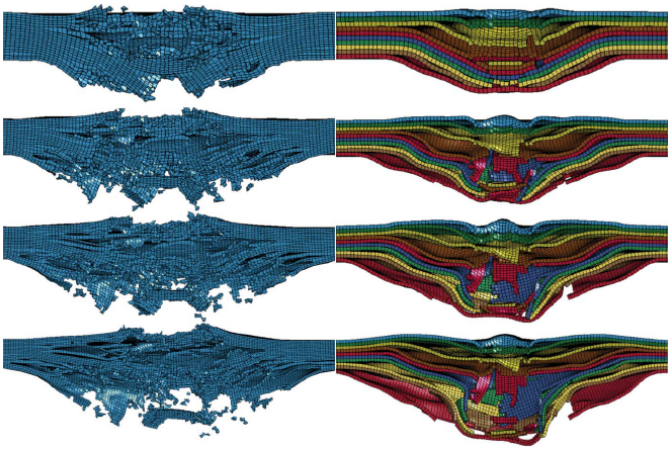


Figura 3.21: Evolução da delaminagem no alvo no decorrer do impacto no modelo uniforme (esquerda) e no modelo por camadas (direita) [76]

Globalmente, os modelos conseguem prever as fases de dano predominantes, como a rutura das fibras localizada na zona do ponto de impacto, as grandes áreas sem qualquer tipo de dano, estreitamento do tecido nas duas extremidades livres e movimentação das fibras primárias que possuem ambas as extremidades livres, se estas existirem. Os dois modelos apresentam-se como sendo bastante semelhantes até ao momento em que ocorre rutura das fibras. O modelo macroscópico não consegue, contudo, descrever as interações delicadas entre fibras, devido à sua homogeneidade[41].

Relativamente à malha gerada no modelo do alvo, podemos ter elementos de diversas formas e cada um destes diferentes tipos pode ter um número variado de nós. É frequente a utilização de elementos de casca na modelação, mas também podem ser usados elementos sólidos. São utilizados elementos quadriláteros de quatro ou oito nós e também hexagonais com o mesmo número de nós [19, 53, 62, 41]. A malha está ligada ao material, assim sendo, sempre que um dos dois se deforma, o outro acompanha essa mesma deformação. Esta situação verifica-se tanto para o alvo como para o projétil [71]. De modo a melhorar a precisão dos resultados obtidos, é usada uma malha mais fina na zona do impacto, sendo que o tamanho dos elementos da malha vai aumentando gradualmente na direção das extremidades do painel [15, 19, 71]. No entanto, é importante ter em atenção que os resultados podem ser instáveis quando temos uma densidade

de malha não uniforme, ocorrendo sempre rutura na linha com maior densidade de nós[22]. A densidade de malha afeta diretamente os resultados obtidos, o que torna necessário a que seja realizada uma análise à sensibilidade da malha, sendo, por vezes, necessário definir o tamanho máximo dos elementos constituintes da mesma [53, 15]. Para garantir que os resultados não são sensíveis às dimensões da malha, é importante manter um tamanho de elementos semelhante no projétil e no alvo para evitar problemas no contacto entre ambas as partes devidos ao tamanho relativo das duas malhas[63, 76].

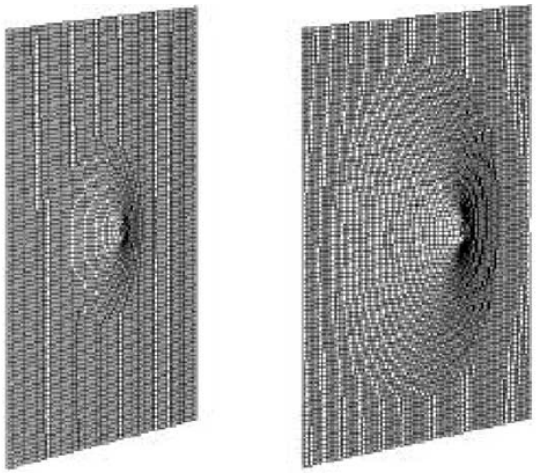


Figura 3.22: Deformação da malha a acompanhar a deformação do painel no instante t e no instante t+Δt [22]

Para modelar o contacto entre o projétil e o painel pode ser utilizado um coeficiente de fricção nominal [16]. Na situação de fricção projétil-material é considerada fricção simples de Coulomb. No entanto, para casos em que se têm tecidos impregnados em fluidos dilatantes, a fricção entre as fibras e o tecido aumenta, levando a que, ao ajustar o coeficiente de fricção no modelo numérico, o comportamento friccional se altere, situação esta que foi verificada experimentalmente [58]. Por vezes, não existem valores de coeficientes de pressão disponíveis, nesses casos é arbitrado um, o que pode levar a algumas incoerências entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos através das simulações numéricas [26].

Dado que o fenómeno de impacto a alta velocidade tem natureza localizada, é frequente a representação de apenas uma porção do painel real nas simulações numéricas [71]. Servindo-nos das condições de simetria do painel, representa-se apenas um quarto da placa, pois permite acelerar a execução do processo de análise, reduzindo assim o tempo de computação necessário para obter uma solução [58, 41].

As condições de fronteira do painel não têm uma influência significativa no modo de rutura do alvo nos impactos a alta velocidade, dada a natureza local da resposta da estrutura. Assim sendo, é possível selecionar três tipos de condições de fronteira, sem influenciar o resultado. É possível não fixar qualquer extremidade do painel, encastrá-lo ou encastrar apenas duas extremidades do modelo, deixando livres as restantes [16, 15, 41, 36, 63, 20, 77].

A análise começa com o painel e o projétil em contacto [71]. O painel encontra-se imobilizado e é atribuída ao projétil uma velocidade inicial [16]. O valor inicial de velocidade atribuído sofre alterações nas diferentes simulações de maneira a que seja possível determinar a velocidade residual do projétil [19, 16]. Durante a análise, os elementos distorcidos sofrem erosão [1] quando atingem um valor de tensão instantânea previamente estipulado[71].

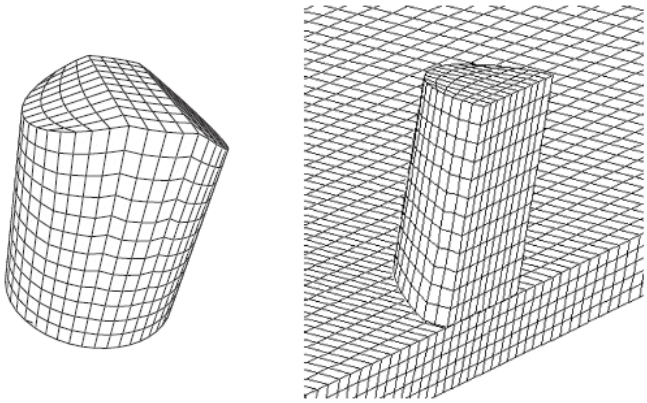


Figura 3.23: Condição inicial da simulação numérica [71]

Com o recurso às simulações numéricas é possível ter em consideração a queda acentuada na absorção de energia absorvida pelo tecido a velocidades de impacto elevadas, conseguindo dividi-la em três regiões distintas. A primeira corresponde à região em que ocorrem impactos com uma velocidade inferior ao limite balístico. Neste caso, o projétil não perfura o alvo, ou seja, a energia absorvida pelo tecido é igual à totalidade da energia cinética que o projétil possuía. A segunda situação corresponde à região compreendida entre o limite balístico e a velocidade crítica. Nesta região, o aumento de tensão inicial é insuficiente para atingir a fratura das fibras. Deste modo, a deformação tem tempo de se propagar até às extremidades dos painéis. A terceira e última região corresponde a impactos com uma velocidade superior à velocidade crítica. Neste caso, temos uma rápida penetração do painel e a quantidade de energia absorvida é bastante reduzida. A deformação transversa está confinada às proximidades do ponto de impacto [22].

Tomando a figura 3.24 como exemplo, observa-se que, inicialmente, devido ao alongamento das fibras primárias, que contribui para a absorção de energia, a velocidade do projétil vai sendo lentamente dissipada. De seguida, a deformação presente nas fibras primárias, causa a propagação da onda de deformação na direção das extremidades do alvo, aumentando assim a taxa de desaceleração do projétil. É também possível observar que a desaceleração do projétil atinge o seu pico no final da zona parabólica visível no gráfico, pois é neste ponto que termina o alongamento das fibras, tornando-se estas completamente tensas daí para a frente. De referir que no modelo macroscópico, o forte decréscimo no valor da velocidade dá-se anteriormente ao modelo mesoscópico. Por fim, da análise do gráfico retira-se que, para maiores velocidades de impacto,

[1] **Erosão:** Processo numérico que permite a remoção automática de elementos quando estes ficam demasiado distorcidos [71]

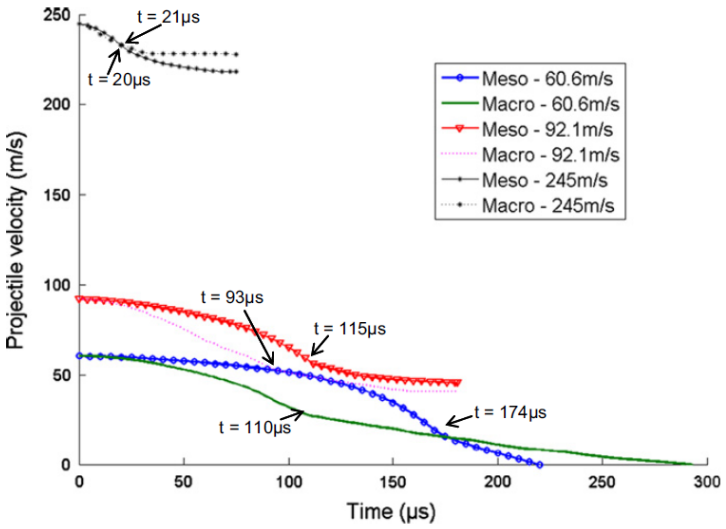


Figura 3.24: Evolução da velocidade do projétil ao longo do tempo para modelo mesoscópico e macroscópico para diversas velocidades de impacto [41]

o comportamento dos modelos em ambas as escalas é bastante semelhante entre si, uma vez que neste caso, apenas as fibras primárias contribuem para a imobilização do projétil, sendo o papel das fibras secundárias desprezável[41].

Apesar do enorme número de vantagens, as simulações numéricas apresentam ainda algumas limitações, nomeadamente no que diz respeito às propriedades dos materiais. Por vezes, o material não se encontra completamente caracterizado e, na impossibilidade de realizar testes experimentais capazes de definir as propriedades necessárias, são usadas aproximações. Um exemplo prático desta situação refere-se ao contexto em que são utilizadas as propriedades estáticas do material ao invés das dinâmicas. Este tipo de aproximações contribui para as inconsistências verificadas entre ensaios experimentais e simulações numéricas, o que impede a utilização mais generalizada das últimas [22].

Capítulo 4

Materiais utilizados

Hoje em dia, existe já uma grande variedade de materiais utilizados em proteção balística. Selecionaram-se alguns deles para avaliar e testar o modelo apresentado neste trabalho.

Neste capítulo serão apresentadas as características dos materiais utilizados neste trabalho que levaram à sua seleção.

4.1 Compósitos laminados

Na indústria aeroespacial, o estudo de impactos de média e baixa energia é um tópico bastante ativo e que gera alguma preocupação. Esta deve-se ao facto de que o dano pode existir de diversas formas, afetando as camadas do laminado a diferentes níveis consoante o tipo que ocorre. Os materiais compósitos são muito utilizados nas indústrias naval, aeroespacial e de transportes terrestres, devido às suas boas propriedades mecânicas. No entanto a sua resistência pode sofrer uma grande diminuição quando sofrem danos por impacto não sendo por vezes visível a causa. Por esta razão é que o uso deste tipo de materiais é ainda algo limitado[27].

4.1.1 Kevlar® e resina de epóxido

É notável o aumento da necessidade de utilização de FRP em aviões, automóveis, estruturas marinhas, indústria desportiva, aplicações militares e muitas outras aplicações em que a rigidez elevada e o baixo peso são grandes preocupações [12]. No entanto, os resultados obtidos para fibras em aramida continuam a ser escassos, uma vez que o seu desempenho está dependente da temperatura de processamento, tempo de arrefecimento, configuração do tecido, humedecimento da fibra, morfologia e rigidez do laminado [71, 15].

A combinação Kevlar®/resina epoxídica é utilizada como escudo protetor em muitas situações, sendo uma delas a estação espacial internacional [12, 76].

Dada a elevada utilização deste material para efeitos de proteção considerou-se pertinente a utilização do mesmo neste estudo.

4.1.2 Fibra de carbono e resina de epóxido

O estudo do impacto é uma área crítica da engenharia, principalmente para a indústria aeronáutica e aeroespacial. Os CFRP são utilizados em ambas as indústrias e também em aplicações militares devido às suas propriedades mecânicas: elevada resistência e rigidez, resistência à corrosão, boa resistência à fadiga, entre outras. No entanto, as suas propriedades translaminares ficam aquém das anteriores, logo tornam-se uma preocupação, uma vez que podem gerar situações críticas quando os CFRP sofrem impacto [54].

Os componentes estruturais podem sofrer danos extensos quando sujeitos a cargas de impacto, o que diminui a sua resistência residual e aumenta o risco de uma falha estrutural em serviço. Estas características motivaram diversos estudos experimentais nesta área, justificando também assim a seleção deste material para este estudo [54].

4.1.3 Kevlar® e PVB

As proteções pessoais são geralmente fabricadas em FRP, sendo o Kevlar®, uma das fibras mais utilizadas, uma vez que possui elevada rigidez e módulo específico elevado, logo apresenta uma grande capacidade de absorção de energia. A última depende das propriedades da matriz e das fibras e está relacionada com o modo de rutura [56].

A maioria dos estudos disponíveis na literatura estão limitados a uma quantidade mínima de formas de pontas de projétil, o que torna pertinente que sejam realizados mais testes para diferentes geometrias, estudando o desempenho do compósito nessas situações [56].

4.1.4 Dyneema® HB26

Os compósitos reforçados com fibras em polietileno de muito alto peso molecular estão a ser cada vez mais utilizados na proteção balística, devido à sua elevada resistência à penetração e baixo peso [63].

Quando sofrem impacto por parte de projéteis, os alvos em UHMWPE exibem deformações muito elevadas. Assim sendo, é necessária uma grande quantidade de alvos para determinar a velocidade limite balístico de um único par. Uma vez que existem várias configurações de alvos para responder a diferentes ameaças, a quantidade de testes efetuada, tendo em conta a espessura de material necessária, acaba por se tornar muito custosa. Deste modo, é altamente desejável estabelecer um modelo computacional eficiente que permita prever adequadamente a resposta do material [63].

4.1.5 Fibra de vidro E-Glass e resina de epóxido

Os FRP são utilizados em aplicações militares, marítimas e aeroespaciais devido ao seu baixo peso e elevada resistência. Para além disso, considera-se que estes têm uma boa relação qualidade-preço no que diz respeito às suas características atenuantes da energia de impacto explosivo e balístico [19].

Foram efetuados muitos estudos relativos ao comportamento de materiais compósitos unidirecionais sujeitos a impacto balístico, contudo, o desempenho balístico de tecidos compósitos é menos compreendido. A utilização deste tipo de arquitetura de material mostra-se como sendo muito promissora para as indústrias militares, marinha, automóvel, aeroespacial e de transportes, daí a sua introdução neste trabalho [19, 26].

4.1.6 Twaron®

O Twaron® é uma fibra de aramida, semelhante ao Kevlar®, muito usada no fabrico de armadura flexível, como é o caso de coletes à prova de bala e outros produtos de proteção balística como capacetes. É um material viscoelástico, o que é uma propriedade com importância significativa no impacto balístico [22].

4.1.7 Hexcel IM7-8552

A utilização de materiais compósitos laminados é ideal em aplicações aeroespaciais. As estruturas típicas destas aplicações devem ter rigidez elevada, baixo coeficiente de expansão térmica e estabilidade dimensional durante o tempo de vida operacional. Os compósitos de alto desempenho satisfazem estas características para além de que oferecem a solução de menor peso para estas estruturas [23].

O Hexcel IM7-8552 é um laminado unidirecional em fibra de carbono e matriz de resina epoxídica muito utilizado em aplicações aeroespaciais, como é o caso dos adaptadores de carga utilizados nos foguetões [23].

4.2 Materiais dúcteis

O impacto de projéteis em alvos metálicos continua a ser alvo de muita pesquisa, uma vez que existe um grande número de fatores envolvidos, incluindo os parâmetros dos materiais, a geometria do alvo e do projétil, condições de fronteira e velocidade de impacto. Se os fatores previamente mencionados forem variados, a sua influência no comportamento mecânico do alvo é elevada, sendo possível que cheguem a resultados opostos quando as condições de impacto são diferentes [40].

4.2.1 Aço

Há muito tempo que o aço é muito utilizado para aplicações protetoras, devido à grande base de dados tecnológica que existe relativamente a este material e o baixo preço a que este pode ser produzido. Deste modo, continua a ser o material dominante no design de equipamentos de proteção face a armas de baixo calibre. Isto deve-se à sua resistência e dureza combinada com a elevada ductilidade e baixo preço, quando comparado com outros materiais utilizados no fabrico deste tipo de equipamentos. Assim sendo, placas finas de aço são frequentemente utilizadas em

aplicações de proteção balística, onde a liga é escolhida em função da aplicação, do desempenho balístico, do peso e do preço [78, 20].

O impacto a alta velocidade é um evento cuja resposta é localizada, o que pode levar a que aços estruturais sejam bons absorvedores da energia resultante do impacto, tal como ligas de aço de armadura especiais, com um preço mais elevado [20].

Selecionaram-se as ligas Weldox 460 E, um aço estrutural ferrítico que oferece elevada resistência combinada com elevada ductilidade e a liga Weldox 700 E, um aço martensítico temperado também com elevada resistência e ductilidade [13, 33].

4.2.2 Alumínio

A procura pela utilização de alumínio em aplicações balísticas tem vindo a crescer devido às vantagens deste metal de baixa densidade na utilização em armaduras de proteção em veículos táticos e de combate. No que diz respeito ao desempenho face a ameaças menores e proteção contra fragmentos, o alumínio apresenta-se como sendo uma opção com um baixo custo. A existência de uma base de produção com grande capacidade com instalações de fabrico, reparação e manutenção estabelecidas contribuem ainda mais para esta alternativa de proteção [39].

4.3 Materiais cerâmicos

Os materiais não metálicos, como os cerâmicos e os compósitos, têm vindo a ser cada vez implementados em armaduras de baixo peso mais eficientes. Painéis híbridos constituídos por peças cerâmicas e painéis compósitos formam um escudo protetor bastante eficiente contra ameaças a baixa e alta velocidade. Isto porque combinam a baixa densidade, elevada dureza, elevada rigidez e resistência à do cerâmico com o baixo peso e ductilidade do laminado compósito [36].

Estas armaduras têm sido alvo de cada vez mais investigações uma vez que apresentam um excelente desempenho face ao impacto de projéteis de calibre baixo e médio. Quando o peso é uma condição importante para o desenvolvimento de equipamentos de proteção, esta opção tem sido selecionada para ser utilizada no fabrico de veículos de baixo peso, armadura pessoal e na proteção de helicópteros e aviões [70, 36].

No momento de impacto, os materiais cerâmicos provocam a erosão do projétil, dissipando, deste modo, energia, para, de seguida, o painel posterior em material compósito absorver a energia cinética residual e imobilizar o projétil [53].

4.3.1 Carboneto de boro

A resposta do carboneto de boro a solicitações de impacto é complexa, o que motiva a contínua realização de estudos, na tentativa de adquirir uma melhor compreensão desta [44].

O comportamento do carboneto de boro face a impactos a alta velocidade é significativamente diferente do do nitreto de alumínio ou carboneto de silício. O carboneto de boro entra em rutura

e perde resistência assim que o limite elástico de Hugoniot é atingido, o que não se verifica nos outros dois materiais [44].

Dadas as grandes diferenças de resposta existentes entre este material e os restantes que lhe são semelhantes, considerou-se apropriada a inclusão do mesmo neste estudo.

4.3.2 Alumina 99.5%

Geralmente, as armaduras não são unicamente constituídas por materiais cerâmicos, sendo comum o acrescento de camadas de materiais compósitos ou dúcteis na parte posterior das mesmas. Um aspeto difícil na modelação de materiais cujas propriedades se alteram ao longo da espessura é a classificação dessa mudança [74, 36].

A alumina provoca a erosão do projétil, permitindo ao compósito deformar-se para absorver a energia cinética residual do projétil, imobilizando-o [36].

Em contraste, ao desenvolver uma armadura com materiais cerâmicos e dúcteis, o principal objetivo é que exista uma alteração gradual do seu comportamento, desde uma resposta frágil, na parte frontal, para uma dúctil, na parte posterior [74].

A análise de painéis balísticos de dois constituintes ainda não foi estudada por muitos autores, daí o interesse de desenvolver mais investigação acerca deste assunto [36].

4.3.3 Carboneto de silício

O carboneto de silício é um material muito duro e é sobretudo usado em cargas à compressão, podendo apenas suportar baixa tensão. A sua rigidez é dependente da pressão a que está sujeito. Quando sofre impactos a alta velocidade, o dano sofrido pelo material desempenha um papel importante na evolução da sua resistência. Quando sofre rutura, o carboneto de silício não é capaz de suportar qualquer tipo de carga [73].

Devido à sua elevada resistência, aplicações típicas em que é utilizado vão desde travões de carros a coletes à prova de bala [73].

Capítulo 5

Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos, ou MEF, é um procedimento de cálculo numérico que permite a resolução de equações parciais diferenciais ou integrais. O Método dos Elementos Finitos permite aos utilizadores obter a evolução espacial ou temporal das variáveis que representam o comportamento do sistema físico. O MEF apresenta-se como um método poderoso para calcular deslocamentos, tensões e deformações numa estrutura carregada[65].

O objetivo dos métodos numéricos como o MEF é encontrar uma solução para as equações matemáticas que governam o problema ao invés de uma solução exata como acontece com os métodos analíticos. Assim sendo, a estratégia seguida pela maioria dos métodos numéricos consiste na transformação das expressões matemáticas num conjunto de equações algébricas que envolvem milhares de incógnitas. Por esta razão, o sistema final apenas consegue ser resolvido com o auxílio de computadores[65].

Considerando um sistema, sabe-se que o comportamento de um determinado fenómeno depende da geometria do sistema, das propriedades do material ou do meio e das condições de fronteira, iniciais e de carga. Os problemas de engenharia têm, na sua grande maioria, geometrias complexas, podendo o mesmo ser dito relativamente às condições de fronteira e condições iniciais do problema. As equações que regem estes fenómenos são também bastante complexas, sendo muito difícil conseguir resolvê-las recorrendo a métodos analíticos. Por esta razão, a maioria dos problemas são resolvidos utilizando métodos numéricos, como é o caso do MEF[52].

O procedimento computacional envolvendo o Método dos Elementos Finitos consiste em quatro passos: modelação da geometria, discretização do domínio, especificação das propriedades materiais e especificação das condições de fronteira, iniciais e de carga[52].

5.1 Software utilizado - ABAQUS®

No decorrer deste trabalho foi utilizado o software de elementos finitos, Abaqus 2016®, mais especificamente o pacote Abaqus/Explicit.

O Abaqus/Explicit permite simular eventos dinâmicos, como é o caso do impacto balístico. Este software apresenta uma grande capacidade de analisar, de uma maneira muito eficiente, comportamentos fortemente não lineares, como por exemplo o contacto.

Este pacote está integrado no ambiente de modelação do Abaqus/CAE para todas as necessidades comuns de pré e pós processamento.

O Abaqus/CAE é a plataforma gráfica do software que permite a criação, edição, acompanhamento, diagnóstico e visualização das análises numéricas avançadas. A interface intuitiva integra a modelação, a análise, o acompanhamento do cálculo e a visualização dos resultados. Permite a criação de modelos no próprio software a ainda a importação de modelos CAD, efetuando apenas a discretização dos mesmos[72].

5.2 Considerações iniciais

Os modelos efetuados representam diferentes conjuntos projétil-alvo. Nesta secção são apenas apresentadas as características comuns a todos os modelos, sendo as propriedades específicas utilizadas na modelação apresentadas na secção 5.4.

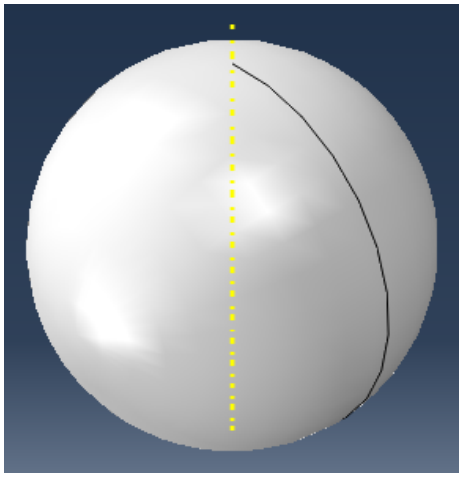


Figura 5.1: Modelação de um projétil de diâmetro 8 mm

O primeiro passo da modelação consiste na criação de ambas as partes: o projétil e o painel. O painel, cujas dimensões para cada caso são selecionadas de modo a que as condições de fronteira não interfiram no resultado do problema, é modelado com elementos de casca quadriláteros de 4 nós e integração reduzida, designados por S4R no Abaqus®. Na área central do alvo é definida uma partição que nos vai permitir, mais tarde, refinar a malha nessa zona. O projétil selecionado é uma esfera com comportamento elástico, sendo utilizados na sua modelação elementos C3D10M, isto é, elementos sólidos tetraédricos com 10 nós. A utilização de elementos de casca na modelação, assim como as reduzidas dimensões dos alvos, destinam-se a reduzir o tempo de computação dos modelos, de modo a efetuar uma rápida análise da influência de um determinado conjunto de parâmetros. A seleção da forma esférica para o projétil vem, não só da simplicidade

de modelação desta forma, mas também porque ela evita a presença de impactos não admissíveis devido à alteração da rota do projétil durante o seu voo[54, 22].

Procede-se à criação dos materiais do alvo e do projétil no módulo *Property* do *software*. Para atribuir um material ao projétil é criada uma secção homogénea de elementos sólidos. Relativamente ao alvo, o material é-lhe atribuído recorrendo à opção *Composite Lay-up*, onde é possível definir, para além do material, a região a que se aplica, a espessura da camada e, consequentemente, do alvo, e o ângulo de orientação das camadas do laminado.

De seguida, prosseguimos para a montagem do conjunto. Para isso, criamos as *instances* e posicionamos o projétil tangente ao alvo, no seu centro [71].

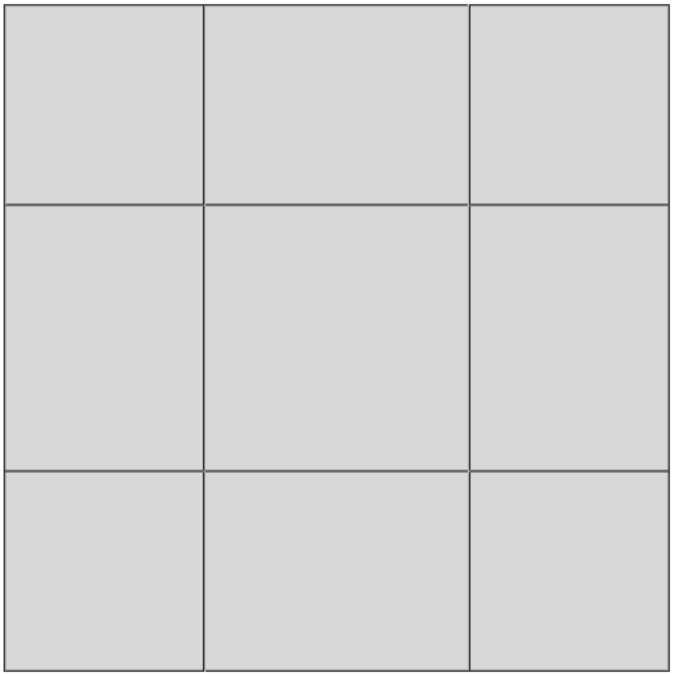


Figura 5.2: Modelação de um painel de dimensões 100×100 mm com uma partição de 40×40 mm

A etapa que se segue passa pela criação da iteração dinâmica, da vertente explícita, definindo também já o seu período de tempo. Ainda no módulo *step* do *software*, definem-se as variáveis de saída que se pretendem analisar. São selecionadas variáveis de tensão, de deformação, deslocamento e velocidade, de forças, variáveis de rutura e dano e, por fim, a variável *STATUS* que retorna alguns modos de plasticidade e rutura.

O projétil e o alvo interagem mutuamente no momento do impacto, assim sendo é necessário criar uma propriedade de interação entre eles. Neste caso, definiu-se uma propriedade de contacto com comportamento normal e tangencial sem atrito entre os dois componentes.

As condições de fronteira do problema são definidas no módulo *Load*. Uma vez que o fenómeno de impacto a alta velocidade possui uma resposta localizada, todos os painéis foram fixados nas suas extremidades. Ou seja, foi-lhes aplicada uma condição de fronteira de encastramento

nesse local. Já ao projétil é atribuída uma velocidade inicial, que ele manterá até encontrar um obstáculo, altura essa em que a sua velocidade sofrerá alterações.

Por fim, é necessário discretizar ambos os componentes, tendo em atenção que a malha do painel deve ser estruturada. Os elementos utilizados na discretização do alvo possuem 3 ou 4 mm de lado, consoante as suas dimensões, sendo a malha na zona da partição refinada com elementos de dimensões 0.5 mm. Os elementos usados no painel são elementos quadriláteros, enquanto que os do projétil são tetraédricos. É, ainda, necessário selecionar a opção que permite a eliminação de elementos no painel quando estes se encontram demasiado distorcidos.

Nesta fase resta-nos apenas efetuar o cálculo, visualizando e analisando, posteriormente, os resultados obtidos.

5.3 Modelos de dano

Nas próximas secções é explicado o modo de funcionamento dos modelos constitutivos de Hashin, Johnson-Cook e Johnson-Holmquist, utilizados na modelação de materiais compósitos, dúcteis e cerâmicos, respetivamente. Estes modelos foram selecionados, pois são aqueles que se encontram implementados no software Abaqus®.

5.3.1 Critério de Hashin

Dada a grande variedade de laminados existentes, determinar critérios de rutura para todos eles experimentalmente torna-se uma tarefa árdua. Assim sendo, é necessário estabelecer um critério de rutura para materiais reforçados uniaxialmente [42].

Começa-se por considerar o problema mais simples existente, um laminado uniaxial sujeito a um estado plano de tensão. Se existir apenas carga axial, essa é suportada pelas fibras, ou seja, a carga necessária para a rutura é função da resistência das fibras e das propriedades elásticas dos constituintes [42].

À medida que aumenta o ângulo de inclinação das fibras, a tensão nestas decresce e aumentam as tensões transversa e de corte na matriz. Surgem na matriz falhas na direção das fibras que levam à sua rutura antes de ocorrer rutura nas fibras [42].

Dadas as diferenças entre os dois modos de rutura é perfeitamente razoável considerar que eles são independentes, o que se pode expressar matematicamente através da expressão [42].

$$\sigma_A = X \tag{5.1}$$

$$F(\sigma_T, \tau) = 1 \tag{5.2}$$

Onde σ_A representa a tensão na direção das fibras e σ_T, a tensão na direção transversa.

A equação 5.2 pode ser aproximada por uma função quadrática.

$$A\sigma_T^2 + B\sigma_T\tau + C\tau^2 = 1 \tag{5.3}$$

Onde A, B e C são constantes.

O material é insensível à direção da tensão de corte. Assim sendo, quando está sujeito a um estado de tensão σ_T e a rutura for causada por τ, então σ_T-τ também pode causar rutura. Como o produto $\sigma_T \times \tau$ tem sinais diferentes nos dois estados de tensão, não pode aparecer no critério, logo B=*0* [42].

Definindo a tensão de rutura na direção transversa como Y e a tensão de corte como S, a equação 5.4 vem:

$$(\frac{\sigma_T}{Y})^2 + (\frac{\tau}{S})^2 = 1 \tag{5.4}$$

Para o caso estático, as tensões de rutura X, Y e S são constantes do material, tendo as primeiras duas, normalmente, valores diferentes para tração e compressão. Assim sendo, podemos dividi-las em duas componentes, utilizando o índice t para a situação de tração e c para a compressão [42].

$$\sigma_A = X_t \rightarrow \ quando\ \sigma_A > 0 \tag{5.5}$$

$$\sigma_A = X_c \rightarrow \ quando\ \sigma_A < 0 \tag{5.6}$$

$$(\frac{\sigma_T}{Y_t})^2 + (\frac{\tau}{S})^2 = 1 \rightarrow \ quando\ \sigma_T > 0 \tag{5.7}$$

$$(\frac{\sigma_T}{Y_c})^2 + (\frac{\tau}{S})^2 = 1 \rightarrow \ quando\ \sigma_T < 0 \tag{5.8}$$

5.3.2 Critério de Johnson-Cook

O modelo constitutivo de Johnson-Cook foi idealizado primeiramente para ser utilizado em computação. O autor reconhece a hipótese que modelos mais complexos, podem originar uma melhor descrição do comportamento do material, no entanto o objetivo passava por ter um modelo relativamente simples e fácil de aplicar para ser utilizado na computação[45].

Os resultados são maioritariamente obtidos através de testes à torção e testes dinâmicos na barra de Hopkinson para diversas temperaturas, sendo também usados dados de ensaios de tração estáticos[45].

O modelo para a tensão de Von Mises é dado pela expressão

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C\ln\dot{\varepsilon^*}][1 - T^{*m}] \tag{5.9}$$

Onde ε é a deformação plástica equivalente, $\dot{\varepsilon^*}$ é a taxa adimensional de deformação plástica, dada por $\dot{\varepsilon^*}$=$\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$, para $\dot{\varepsilon}_0$=1 s^{-1} e T^* é a temperatura homóloga. Sendo as constantes do material, A, B, C, n e m. A expressão inscrita dentro do primeiro par de parênteses dá a tensão em função da deformação quando temos $\dot{\varepsilon^*}$=1 e T^*=0. No segundo e terceiro par de parênteses estão representados os efeitos da taxa de deformação e temperatura, respetivamente[45].

O primeiro passo no processo consiste na determinação das constantes A, tensão de cedência, B e n, que representam os efeitos do encruamento. Dada a existência de dados relativos a testes à tração e à torção, obtêm-se dois conjuntos de constantes. Para o uso geral na computação é aceitável a utilização da média dos resultados obtidos. Através dos testes efetuados na barra de Hopkinson, obtêm-se dados relativos ao amaciamento, representado pela constante m. A fração de amaciamento tende a aumentar à medida que a temperatura aumenta. Seguidamente, determina-se a constante da taxa de deformação, C, sendo o valor final desta igual à média dos resultados obtidos nos testes à tração e à torção[45].

No entanto, nenhuma das variáveis anteriormente mencionadas envolve a análise do dano, assim sendo foi concebido um outro modelo que pretende evidenciar os efeitos relativos entre os diferentes parâmetros. Tenta também ter em conta a dependência da trajetória na acumulação de dano à medida que a deformação progride. O modelo apresentado usa um número limitado de constantes e é maioritariamente dependente da deformação, taxa de deformação, temperatura e pressão[46].

O dano para um elemento define-se como

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^f} \tag{5.10}$$

Onde $\Delta\varepsilon$ é o incremento da deformação plástica equivalente que ocorre durante um ciclo de integração e ε^f é a deformação de rutura equivalente nas condições atuais de taxa de deformação[46].

A expressão geral para a deformação na rutura é:

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3\sigma^*][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^*] \tag{5.11}$$

Em que D_1, D_2 e D_3 são as constantes relacionadas à razão pressão-tensão, a constante D_4 define a taxa de deformação, enquanto que a informação relativa à temperatura é dada pela constante D_5[46].

5.3.3 Critério de Johnson-Holmquist

O modelo original de Johnson-Holmquist, JH-1, inclui pressão dependente da resistência, do dano e da rutura, resistência significativa após rutura, aumento do volume e efeitos da taxa de deformação. Contudo, o modelo não tinha em conta o amaciamento gradual que ocorre com alguns materiais, por exemplo, o carboneto de boro. Esta situação aliada ao facto de que algumas aplicações são muito sensíveis às constantes utilizadas no modelo e aos problemas gerados devido ao salto entre as constantes do material intacto e do material fraturado na abordagem Euleriana, surgiu o JH-2. O último apresenta-se como um modelo constitutivo melhorado para a modelação de materiais frágeis [47].

A tensão normalizada equivalente, σ^*, é dada por

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \tag{5.12}$$

Onde σ_i^* é a tensão equivalente intacta normalizada, σ_f^* é a tensão equivalente após rutura normalizada e D é o dano, que varia entre 0 e 1 [47].

As tensões equivalentes normalizadas, σ^*, σ_i^* e σ_f^*, têm a fórmula geral:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\sigma_{HEL}} \tag{5.13}$$

Onde σ é a tensão equivalente real e σ_{HEL} é a tensão equivalente no limite elástico de Hugoniot [47].

A tensão intacta normalizada é dada por:

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*) \tag{5.14}$$

E a tensão após rutura é dada pela expressão

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*) \tag{5.15}$$

$$P^* = P/P_{HEL} \tag{5.16}$$

$$T^* = T/P_{HEL} \tag{5.17}$$

Os parâmetros A, B, C, M, N e σ_{max}^f são constantes do material. A equação 5.16 dá a pressão normalizada, sendo P, a pressão real, e P_{HEL}, a pressão no limite elástico de Hugoniot. A pressão hidrostática à tração máxima normalizada, T^* é obtida através da equação 5.17, onde T é a pressão hidrostática à tração máxima que o material consegue aguentar. A taxa de deformação adimensional é dada por $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$, onde $\dot{\varepsilon}$ é a deformação real e $\dot{\varepsilon}_0$=*1* é a taxa de deformação de referência [47].

O dano é acumulado numa maneira semelhante à do modelo de Johnson-Cook, regendo-se pela expressão

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon^P}{\varepsilon_f^P} \tag{5.18}$$

Da equação anterior, retira-se que $\Delta\varepsilon^P$ é a deformação plástica durante um ciclo de integração e ε_f^P é a deformação plástica necessária para a rutura sob a ação de uma pressão constante, P, dada pela equação 5.19 [47].

$$\varepsilon_f^P = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \tag{5.19}$$

Na equação anterior, D_1 e D_2 são constantes e P^* e T^* já foram anteriormente definidas. O material não pode sofrer deformação plástica para P^*=-T^*, no entanto, ε_f^P aumenta à medida que P^* aumenta [47].

A pressão hidrostática antes de existir dano, ou seja, para D=0, é dada pela expressão:

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \tag{5.20}$$

Onde K_1, K_2 e K_3 são constantes em que K_1 é o módulo elástico de volume e $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, onde ρ é a densidade atual e ρ_0 é a densidade inicial [47].

5.4 Validação numérica com base na literatura

Para validar a abordagem definida, foi necessário efetuar uma validação prévia. Esta validação foi feita recorrendo a literatura e é apresentada nesta secção. A análise foi efetuada relativamente à velocidade do projétil e à área danificada que resulta da colisão. Estes dois parâmetros foram estudados variando a espessura do alvo e o ângulo de impacto do projétil. Os resultados obtidos através do modelo simplificado são comparados com os resultados obtidos experimentalmente na literatura. Na ausência desses mesmos resultados, ou como complemento à comparação com a campanha experimental são também apresentados os resultados obtidos por cálculo numérico expressos na literatura.

5.4.1 Materiais compósitos

O modelo referente aos materiais compósitos é validado nesta secção. Para isso, recorreu-se a cinco artigos que estudam materiais de diferentes propriedades sujeitos a diferentes impactos para o validar. Analisou-se a velocidade do projétil e a área danificada do alvo, tendo em conta as alterações na espessura do alvo, na velocidade e ângulo de impacto do projétil.

5.4.1.1 Kevlar® e resina de epóxido

A capacidade de prever o comportamento de laminados compósitos em duas escalas diferentes, quando sujeitos a impacto balístico, foi estudada por Zhang et al [76]. Foi também investigada a viabilidade do modelo desenvolvido aliado a um modelo matemático na avaliação das propriedades mecânicas médias de compósitos com diferentes constituintes.

O modelo uniforme baseia-se no pressuposto que cada laminado, sem considerar a sua estrutura microscópica, é equivalente a um material ortotrópico homogéneo. Na segunda abordagem, escala mesoscópica, o alvo é decomposto em diversas camadas, cada uma delas modelada com elementos sólidos [76].

O projétil em aço, modelado como um material rígido, possui forma cilíndrica, sendo o seu diâmetro 7.62 mm e 15.24 mm o seu comprimento. O laminado, de espessura total 5mm, divide-se em 10 camadas de igual espessura e sequência de empilhamento $[0/90]_5$ [76].

O projétil e os alvos foram discretizados com uma malha estruturada uniforme de elementos hexaédricos com um único ponto de integração.

Tabela 5.1: Propriedades do projétil em aço 4340 [76]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	7.83E-9
E [MPa]	200E3
ν	0.3

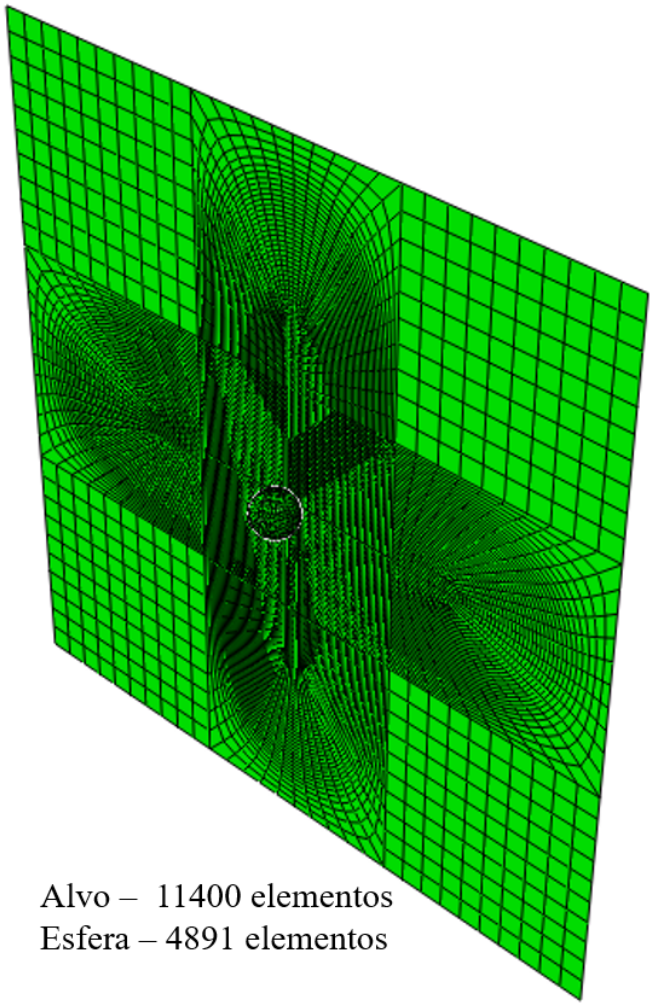


Figura 5.3: Instante inicial do impacto de um projétil de aço num alvo em Kevlar®/resina de epóxido

Os laminados unidirecionais possuem uma percentagem de volume igual a 75% de fibra de aramida e 25% de matriz em resina epoxídica, as suas propriedades encontram-se representadas de seguida [76].

Tabela 5.2: Propriedades do alvo de Kevlar® em matriz de resina epoxídica[76, 14]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	1.384E-9
E_1 [MPa]	21 000
E_2 [MPa]	4600
ν_{12}	0.14
G [MPa]	1300
X_t [MPa]	1200
X_c [MPa]	1200
Y_t [MPa]	200
Y_c [MPa]	600
S_t [MPa]	350
S_l [MPa]	350

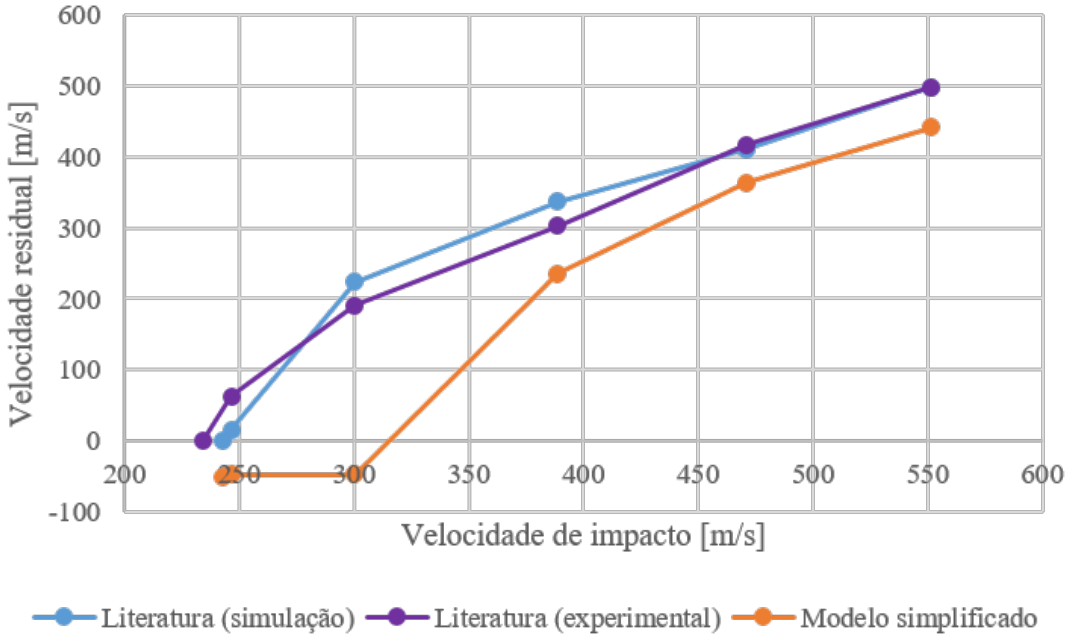


Figura 5.4: Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo em Kevlar® e resina epoxídica [76]

Observando a figura 5.4 é percetível o aumento da velocidade residual do projétil com o aumento da velocidade de impacto. Contudo, o modelo simplificado só apresenta penetração para velocidades superiores a 300 m/s, apresentando bastantes diferenças para velocidades inferiores a este valor. A diferença de forma entre os projéteis utilizados neste trabalho e na literatura pode estar na origem da discrepância entre as velocidades residuais. Para valores de velocidade de impacto mais elevados, os resultados obtidos através do modelo simplificado apresentam boa concordância com os provenientes da literatura.

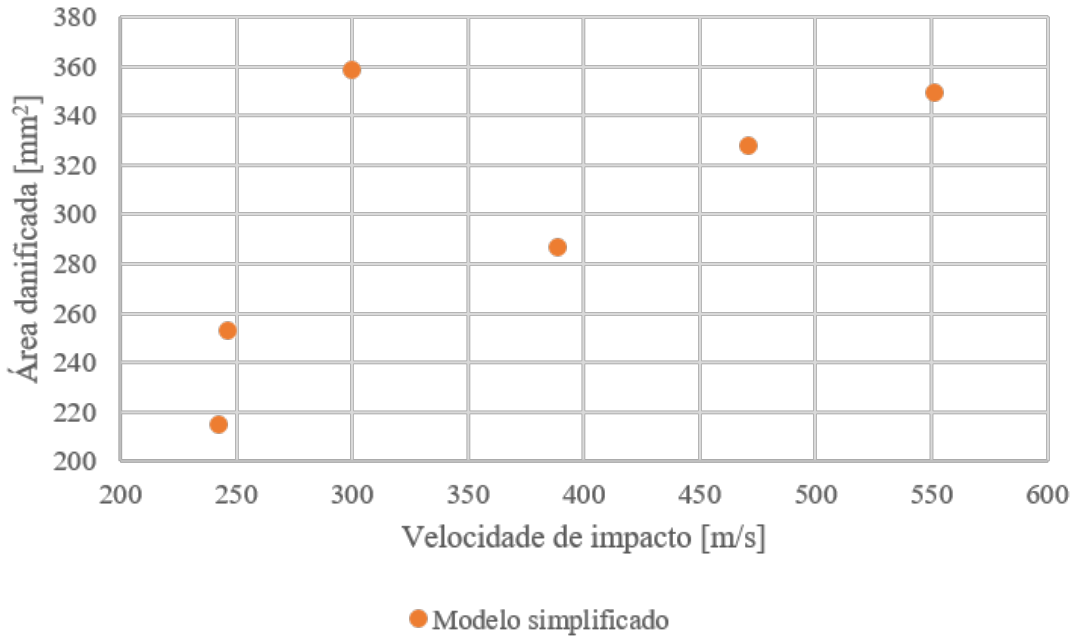


Figura 5.5: Área danificada num alvo em Kevlar®/resina de epóxido em função da velocidade de impacto

Na figura 5.5 encontram-se representados os resultados obtidos para a área danificada, em mm^2, em função da velocidade de impacto do projétil, em m/s. De acordo com Zhang et al. [76], a deformação é localizada em torno da trajetória percorrida pelo projétil.

Ainda analisando a mesma figura, verifica-se um aumento da área danificada até ao ponto em que ocorre perfuração total do alvo. Depois deste ponto, a área danificada diminui sofrendo novamente um aumento, sendo que os valores obtidos nunca são superiores ao obtido na zona do limite balístico, o que está parcialmente de acordo com o esperado. A expectativa era que o valor de área danificada obtido correspondesse à velocidade limite balístico. Esta situação verifica-se, o que não se verifica é a consequente diminuição da área danificada após esse ponto. Tal como no caso da velocidade, esta situação pode estar relacionada com a forma do projétil ou com a implementação do material, isto é, o critério de rutura selecionado.

5.4.1.2 Fibra de carbono e resina de epóxido

López-Puente et al. [54] estudaram a influência do ângulo de impacto a altas velocidades na colisão com laminados CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer, finos. Primeiramente, fizeram vários testes experimentais para ângulos de 0° e 45° numa gama de velocidades que varia desde valores característicos para a descolagem e aterragem de um avião, aproximadamente 70 m/s, a valores típicos da balística, 500 m/s. Foi possível determinar velocidades limite balístico, velocidades residuais e também a extensão de dano que os laminados apresentavam após a colisão.

Recorrendo a estes resultados validaram um modelo numérico desenvolvido especificamente para CFRP, que foi utilizado para estender a análise para diferentes ângulos de impacto [54].

O modelo numérico representa o conjunto projétil-alvo, em que o projétil é uma esfera de aço com comportamento linear elástico, de diâmetro 7.5 mm que colide com um alvo cuja modelação deriva do modelo Chang-Chang modificado. Isto é, dos quatro modos de rutura definidos nesse modelo, apenas dois deles, delaminagem e rutura de fibras, foram considerados neste estudo [54].

Tabela 5.3: Propriedades do projétil em aço [54]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	7.8E-9
E [MPa]	210E3
ν	0.3

Para remover os elementos distorcidos, foi adotado um critério de deformação máxima em que são calculadas as deformações principais nos elementos após cada incremento, se alguma delas atingir o valor crítico, esse elemento será apagado [54].

Para a discretização do painel foi utilizada uma malha tridimensional não homogénea em que os os elementos prismáticos com oito nós e integração reduzida possuíam menores dimensões no centro do laminado, local onde ocorre o impacto. O projétil foi modelado utilizando elementos de casca com 4 nós e integração reduzida [54].

Os laminados em fibra do tipo AS-4 8552 com matriz de resina epoxídica possuem uma espessura total de 2.2 mm, estando divididos em dez camadas de igual espessura, todas elas orientadas a 0°. As propriedades do laminado estão listadas na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Propriedades do alvo em fibra AS-4 e matriz de resina epoxídica 8552 [54, 14]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	1.58e-9
E_1 [MPa]	68 500
E_2 [MPa]	68 500
G_{12} [MPa]	3700
ν_{12}	0.11
X_t [MPa]	795
X_c [MPa]	860
Y_t [MPa]	795
Y_c [MPa]	860
S_t [MPa]	98

Recorrendo ao modelo simplificado, analisou-se o impacto para duas situações distintas. A primeira, com o projétil a colidir num ângulo de 0° e a segunda num ângulo de 45°, tendo mantido

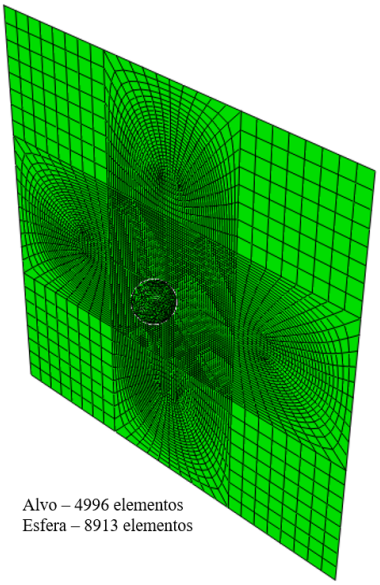


Figura 5.6: Instante inicial do impacto por parte de um projétil de aço num laminado CFRP

todas as restantes propriedades iguais. Em ambas as situações, como já foi referido anteriormente, na iteração inicial, o projétil está em contacto com o alvo.

Impacto a 0°

O modelo foi testado para diversas velocidades, tendo sido comparada a velocidade residual obtida através do modelo simplificado com os resultados experimentais e numéricos apresentados na literatura.

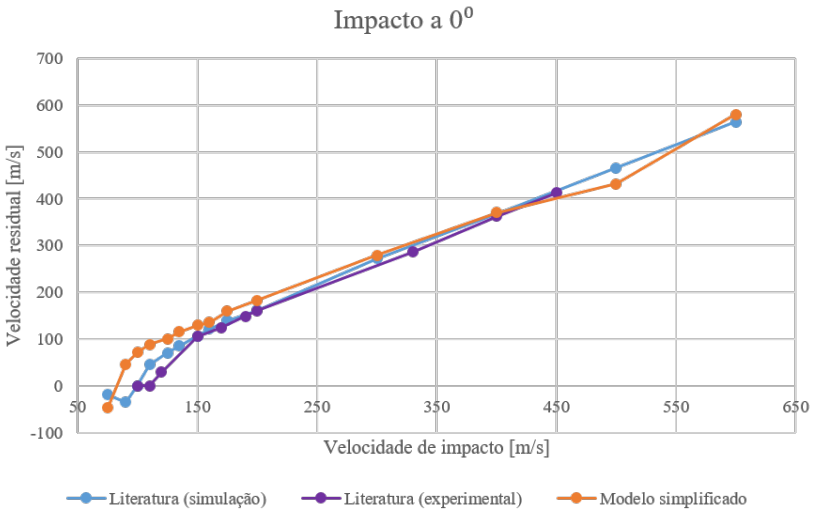


Figura 5.7: Velocidade residual em função da velocidade de impacto do projétil, com um ângulo de impacto igual a 0°, num alvo em carbono/resina epoxídica[54]

Observando a figura 5.7, rapidamente se concluí que o modelo simplificado apresenta bons resultados relativamente aos obtidos na literatura, tanto experimentalmente como por simulação numérica.

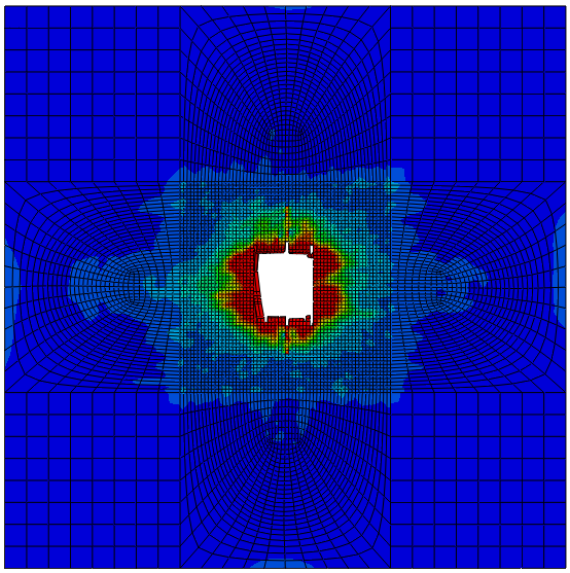


Figura 5.8: Área danificada na primeira camada de um alvo em fibra de carbono após colisão com um projétil de diâmetro 7.5 mm a 160 m/s

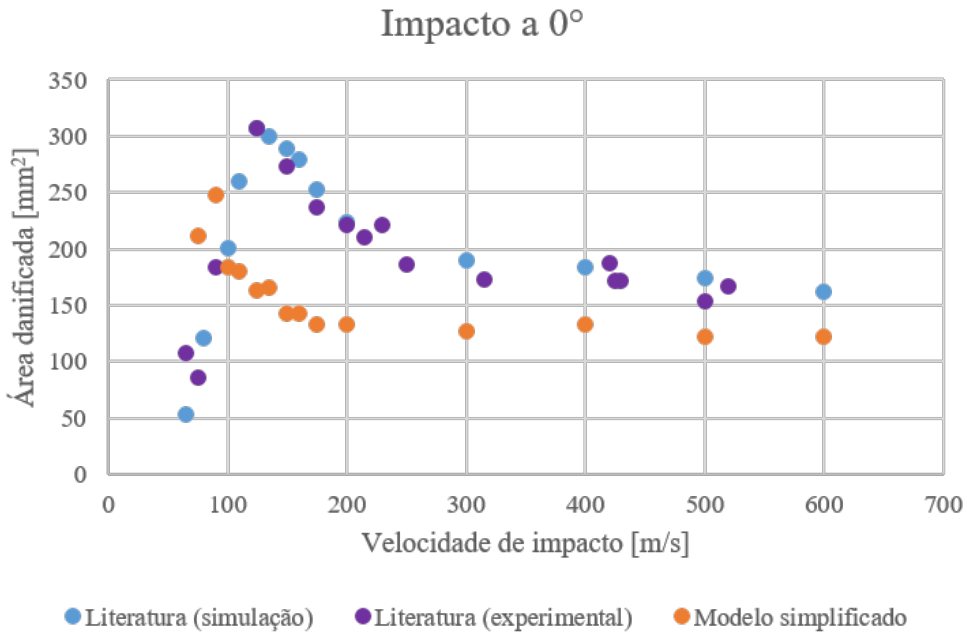


Figura 5.9: Área danificada de um alvo em fibra de carbono em função da velocidade de impacto de um projétil em aço, de diâmetro 7.5 mm, com um ângulo de inclinação igual a 0° [54]

No que diz respeito aos resultados obtidos para a área danificada, estes não são tão satisfatórios como os obtidos para a velocidade residual. Denota-se o mesmo pico no gráfico referente ao ponto em que passa a ocorrer perfuração total do alvo e a consequente diminuição de área danificada à medida que a velocidade do projétil aumenta. Contudo, quando comparando os resultados obtidos através do modelo simplificado com os da literatura é visível uma discrepância entre ambos.

Impacto a 45°

A mesma análise foi feita para o impacto a um ângulo de 45°. Para este caso, existe uma particularidade na modelação. Ao definir a velocidade inicial da esfera, é necessário ter em conta o ângulo de impacto. Assim sendo, apenas uma das componentes da velocidade é nula, estando as restantes definidas por:

$$Vy = Vi \times \cos(\theta) \tag{5.21}$$

$$Vz = Vi \times \sin(\theta) \tag{5.22}$$

À exceção da velocidade, toda a modelação da situação de impacto para um ângulo de 45° é igual à anterior. No entanto, para um valor de velocidade de impacto igual a 90 m/s, verificaram-se elevadas tensões perto das extremidades do alvo. Assim sendo, optou-se por aumentar as dimensões do mesmo para esta situação em específico.

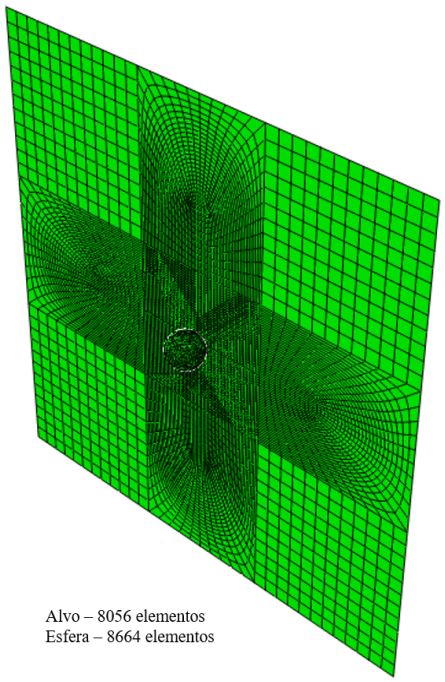


Figura 5.10: Situação particular do instante inicial para o impacto em laminados CFRP por parte de um projétil em aço a uma velocidade de 90 m/s num ângulo de 45°

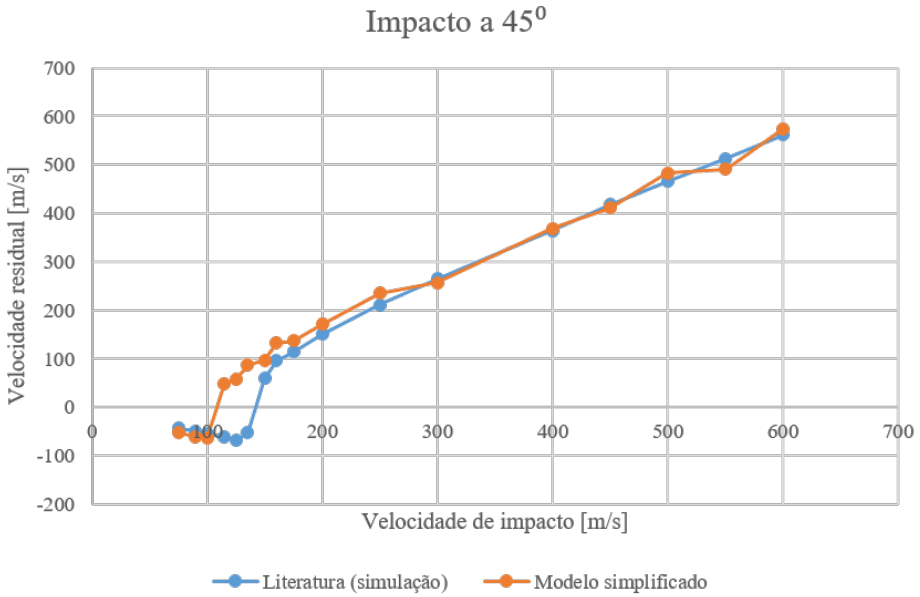


Figura 5.11: Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil, com um ângulo de impacto igual a 45°, num alvo em carbono/resina de epóxido [54]

Mais uma vez, verifica-se uma boa concordância dos resultados provenientes da literatura com os obtidos através do modelo simplificado. O modelo prevê a ocorrência de penetração para velocidades inferiores ao esperado, mas apresenta boa correlação para velocidades superiores.

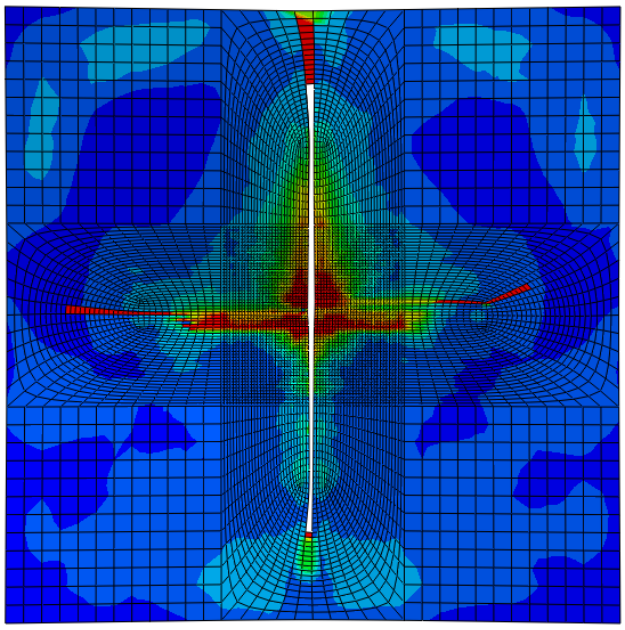


Figura 5.12: Área danificada num alvo em fibra de carbono após colisão num ângulo de 45° de um projétil de diâmetro 7.5 mm a 90 m/s (camada 10)

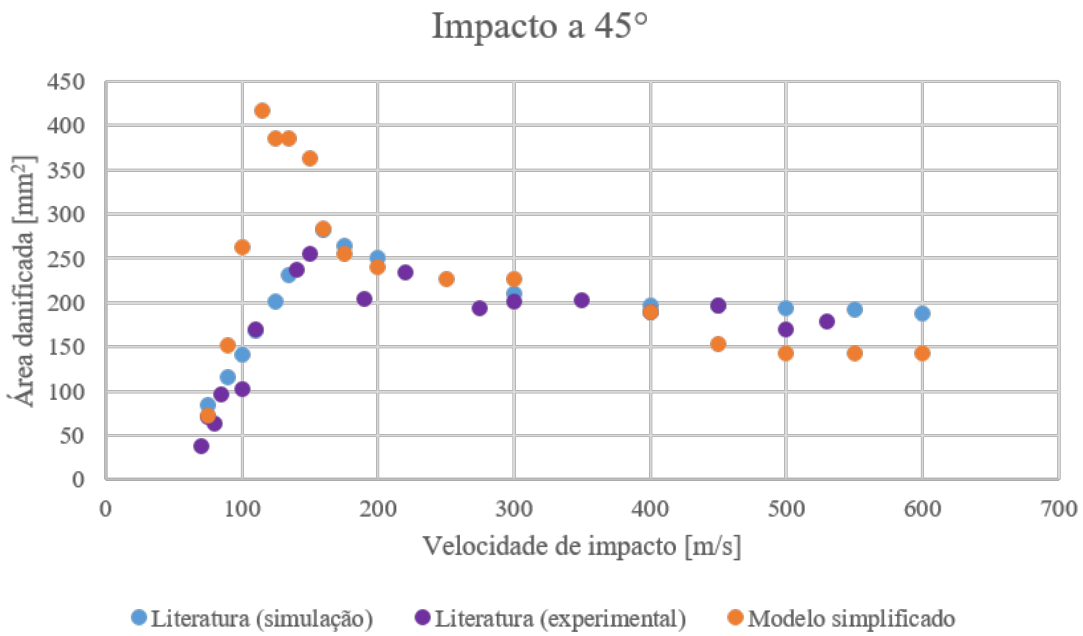


Figura 5.13: Área danificada de um alvo em fibra de carbono em função da velocidade de impacto de um projétil em aço, de diâmetro 7.5 mm, a 45° [54]

Para velocidades inferiores a 160 m/s, o modelo simplificado apresenta resultados bastante superiores ao esperado quando comparando os resultados obtidos com os expressos na literatura. Contudo, para velocidades superiores, apresenta boa concordância com o obtido experimentalmente na literatura e também com as previsões feitas por simulação numérica.

5.4.1.3 Kevlar® e PVB

Foi analisado o desempenho do Kevlar®-29 quando este sofre colisão por parte de projéteis cilíndricos com diferentes tipos de ponta. Analisou-se o limite balístico, modos de ruturas e deformação dos alvos devido ao impacto de projéteis bi-ogivais. Os resultados obtidos foram comparados e discutidos com análises que envolvem projéteis ogivais de ponta cónica ou projéteis de ponta plana [56].

Assumiu-se que os projéteis, em aço, apresentavam comportamento linear elástico, tendo estes sido modelados como corpos 3D deformáveis, uma vez que não se verificou deformação plástica nas suas superfícies após o impacto. Na discretização utilizaram-se elementos prismáticos de integração reduzida, com 1.5 mm de lado. Para validação do modelo foram utilizados projéteis de ponta única, plana ou cónica [56].

Tabela 5.5: Propriedades do projétil em aço 4340[56]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	7.85E-9
E [MPa]	210E3
ν	0.3

Uma vez que os resultados obtidos numericamente através deste estudo foram comparados com trabalhos experimentais provenientes de outros autores, desenvolveram-se dois modelos diferentes para o alvo, cada um com geometria correspondente ao utilizado nos respetivos testes experimentais. Os elementos utilizados para discretizar os alvos, de cinco ou dez milímetros de espessura, foram prismas triangulares lineares de 6 nós, de dimensões 0.75 mm. O comportamento mecânico do Kevlar® foi modelado assumindo comportamento elástico até à rutura, que foi prevista utilizando um modelo modificado do critério de Hashin. Os valores das diferentes propriedades mecânicas do material estão representados na tabela 5.6. O contacto entre o projétil e os painéis foi definido através de um algoritmo de contacto e do modelo de contacto rígido disponível no Abaqus® [56].

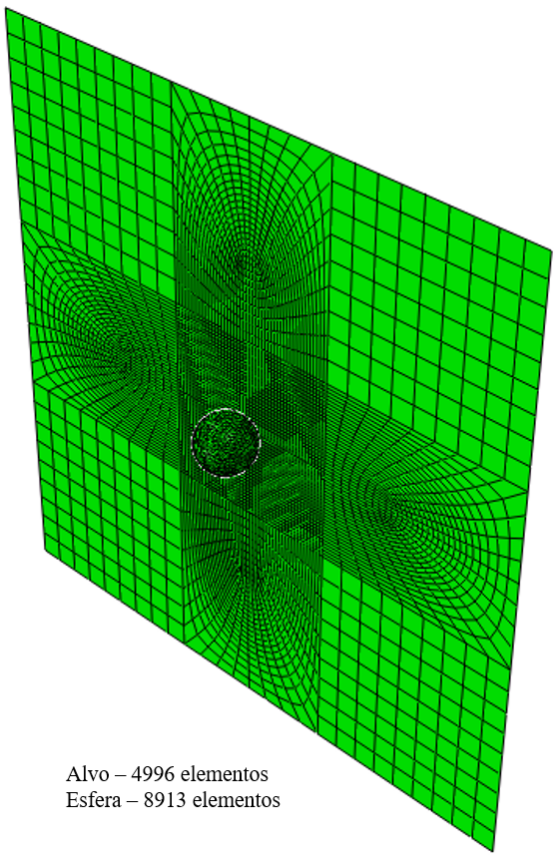


Figura 5.14: Instante inicial do impacto de um projétil de aço num alvo em Kevlar®em matriz PVB

Tabela 5.6: Propriedades do alvo de Kevlar® em matriz PVB[56]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	1.23E-9
E_1 [MPa]	18 500
E_2 [MPa]	18 500
ν_{12}	0.25
G_{12} [MPa]	770
G_{13} [MPa]	5430
G_{23} [MPa]	5430
X_t [MPa]	555
X_c [MPa]	555
Y_t [MPa]	555
Y_c [MPa]	555
S_t [MPa]	898
S_l [MPa]	77

Uma vez que não são fornecidas pelos autores informações relativas à constituição do alvo, consideraram-se camadas orientadas a 0°, com espessura 0.5 mm. Deste modo, o alvo de menor espessura, 5 mm, é constituído por 10 camadas, sendo vinte o número total de camadas constituintes do alvo de 10 mm de espessura.

Espessura igual a 5 mm

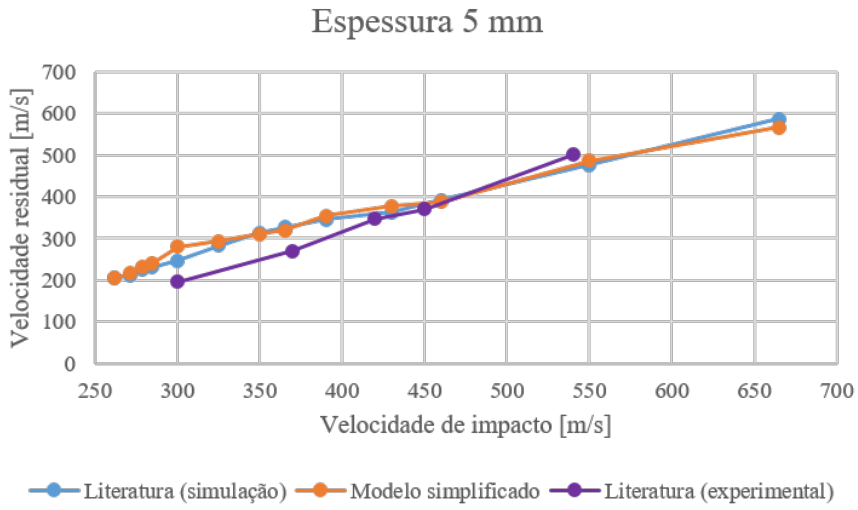


Figura 5.15: Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto num alvo em Kevlar®/PVB de espessura igual a 5 mm[56]

Na figura 5.15 encontra-se representado o valor da velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto do mesmo. O modelo simplificado segue a tendência de aumento da velocidade residual com o aumento da velocidade de impacto, apresentando melhores resultados para valores de velocidade superiores a 400 m/s. É importante referir que os resultados do modelo simplificado, cujo projétil é uma esfera, estão a ser comparados com resultados obtidos para impactos com projéteis bi-ogivais de pontas planas, uma geometria bastante díspar da da esfera.

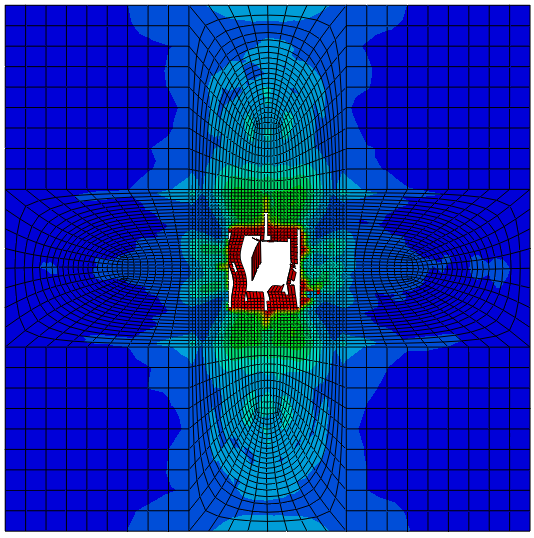


Figura 5.16: Área danificada num alvo em Kevlar®/PVB de espessura 5 mm após colisão com um projétil de diâmetro 7.62 mm a 271.25 m/s (terceira camada)

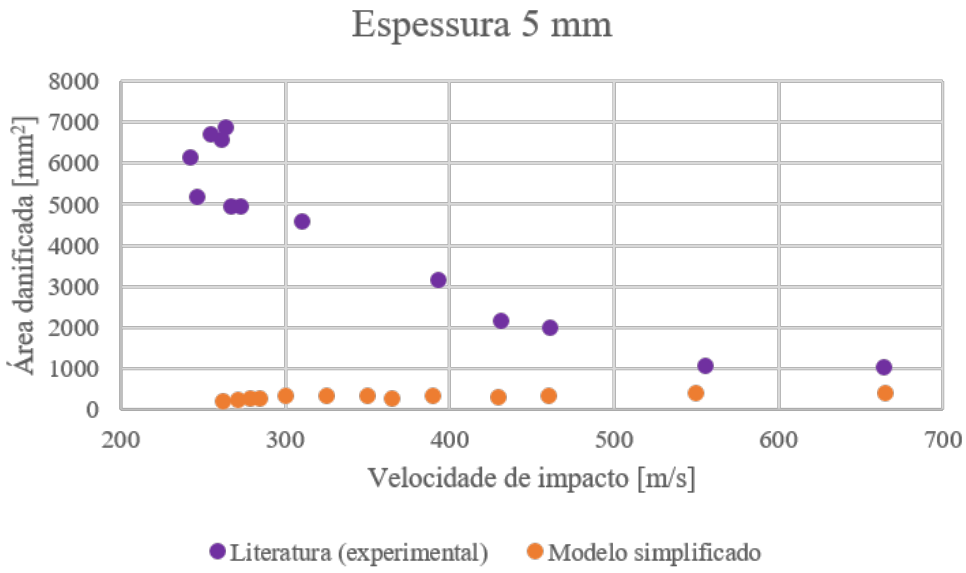


Figura 5.17: Área danificada num alvo em Kevlar®/PVB de espessura 5 mm em função da velocidade de impacto do projétil [56]

Na figura 5.17 encontra-se representada uma comparação entre os resultados expressos na literatura versus os obtidos recorrendo ao modelo simplificado. É notável a discrepância existente entre os dois valores, o que nos leva a concluir que este modelo não se apresenta como uma boa abordagem na análise da área danificada, ficando os valores muito aquém do esperado. De uma forma geral, a esfera origina um dano mais extenso nos painéis do que um projétil de forma penetrante. Contudo, os projéteis utilizados neste estudo por Rodriguez Millán et al. [56] possuem duas pontas, o que pode estar na origem da maior extensão de dano verificada.

Espessura igual a 10 mm

Para o caso de maior espessura, os resultados obtidos apresentam a mesma tendência de aumento da velocidade residual com o aumento da velocidade de impacto, no entanto o erro obtido é maior neste caso.

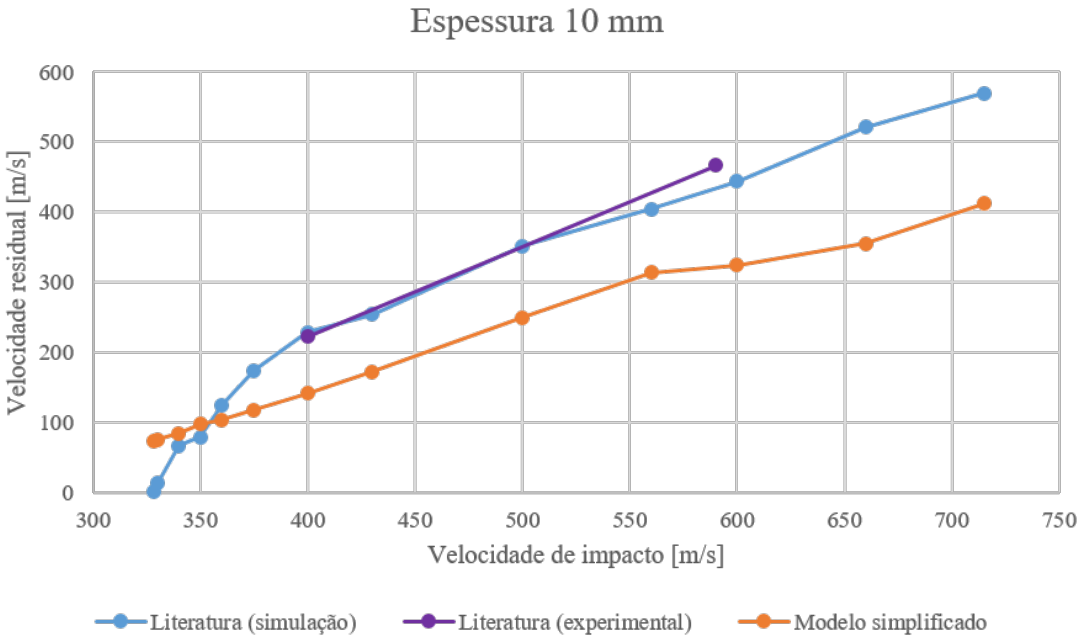


Figura 5.18: Velocidade residual em função da velocidade de impacto do projétil num alvo em Kevlar®/PVB de espessura igual a 10 mm[56]

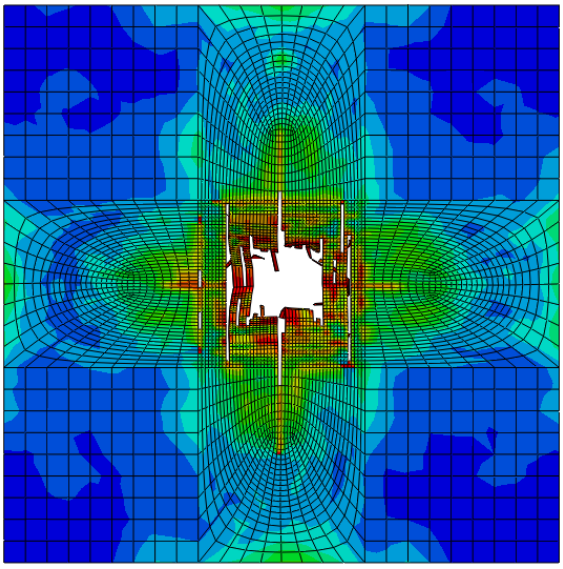


Figura 5.19: Área danificada num alvo em Kevlar®/PVB, de espessura 10 mm, após colisão a 500 m/s com um projétil de diâmetro 7.5 mm (camada 18)

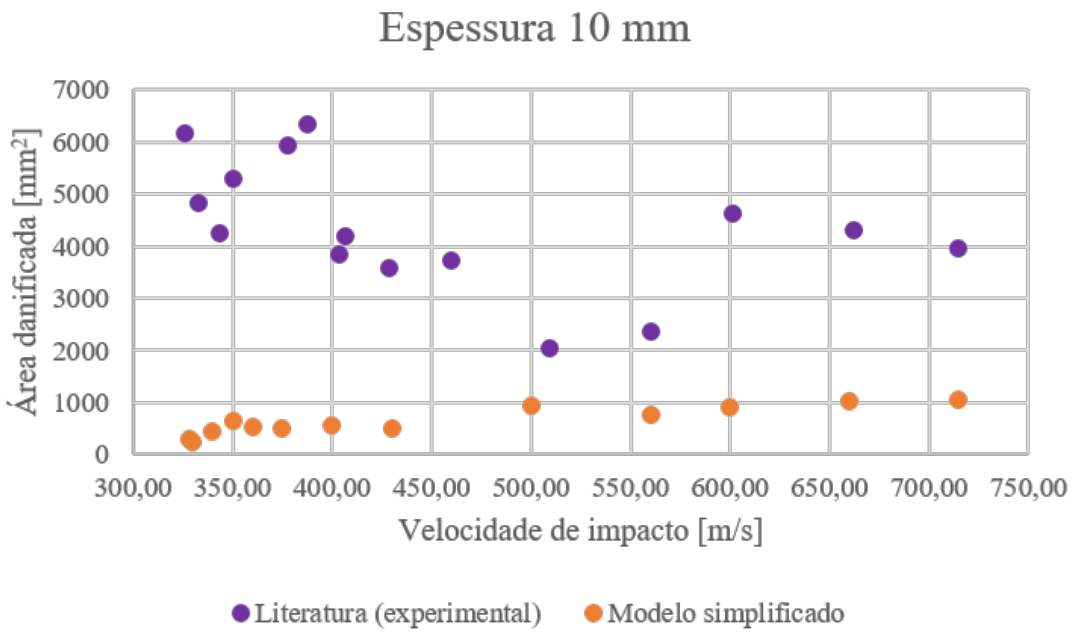


Figura 5.20: Área danificada num alvo em Kevlar®/PVB, de espessura 10 mm em função da velocidade de impacto do projétil

Os valores obtidos para a área danificada de um alvo de espessura 10 mm encontram-se representados na figura 5.20. Volta novamente a existir uma grande diferença entre os resultados obtidos e os esperados, podendo estar as diferenças entre as formas dos projéteis em análise na

origem do erro. Este fator contribui para a hipótese de que o modelo apresentado pode não ser uma boa abordagem de análise no que diz respeito à área do alvo que se encontra danificada após a colisão.

5.4.1.4 UHMWPE - Dyneema HB26

Nguyen et al. [63] propuseram uma metodologia para a análise de compósitos espessos em UHMWPE recorrendo a um modelo ortotrópico não linear. Introduziram ainda um novo modelo de erosão que tem em conta a rutura dependente da direção e um novo conjunto de dados materiais para o UHMWPE foi definido com base em dados experimentais apresentados na literatura. O modelo foi validado recorrendo a um grande número de testes experimentais efetuados por Nguyen et al. [64] e inclui validação da profundidade de penetração e previsões da velocidade limite balístico para alvos de espessura até cento e dois milímetros.

Os projéteis cilíndricos, cujo comportamento é descrito pelo modelo de Johnson-Cook, são de aço e têm diâmetros de 12.7 e 20 mm, consoante a espessura do alvo em estudo [63].

Tabela 5.7: Propriedades mecânicas do projétil em aço 4340[63]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	7.88E-9
E [MPa]	207E3
ν	0.33

Efetuaram-se testes balísticos em alvos com 300×300 mm^2, exceto para as duas maiores espessuras, caso em que os alvos tinham 400 mm de lado. Este foi modelado na totalidade, pois o material constituinte é ortotrópico e o projétil assimétrico. O número de camadas varia consoante a espessura. Para os alvos sujeitos a impacto por parte dos projéteis de menor diâmetro, a espessura de camada é 1.4 mm. No caso da colisão ser com os projéteis de maior diâmetro, a espessura de camada é igual a 2 mm. Assim sendo, os alvos de espessura 9.8, 19.6, 25.2, 35 e 50.4 mm têm sequências de empilhamento de $[0/90]_{2\$}$, $[0/90]_7$, $[0/90]_9$, $[0/90]_{12\$}$ e $[0/90]_{18}$, respetivamente. Para o segundo caso, a sequência de empilhamento é $[0/90]_n$, sendo n igual ao valor da espessura a dividir por 4, exceto para o caso de espessura igual a 10 mm, em que a sequência de empilhamento é $[0/90]_{2\$}$ [63].

Não foram impostas quaisquer condições de fronteira ao alvo. Foram utilizados elementos hexaédricos de 8 nós no modelo e o alvo foi discretizado de modo a formar múltiplas camadas ao longo da espessura do laminado [63].

Tabela 5.8: Propriedades mecânicas do compósito Dyneema HB26 utilizado no alvo[63]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	0.98E-9
E_1 [MPa]	5110
E_2 [MPa]	5110
ν	0.05
X_t [MPa]	1150
X_c [MPa]	1150
Y_t [MPa]	1150
Y_c [MPa]	1150
S_t [MPa]	575
S_l [MPa]	120

Primeiramente vão ser apresentados os resultados obtidos para o projétil de menor dimensão, ou seja, de diâmetro igual a 12.7 mm. Analisando o impacto por parte do projétil de maior diâmetro, obtiveram-se os resultados apresentados para laminados de espessuras 10, 20, 36 e 76 mm, divididos em 5, 10, 18 ou 38 camadas, respetivamente. Nesta secção apenas serão apresentados os casos de menor e maior espessura para cada um dos projéteis, estando os restantes disponíveis no anexo A.

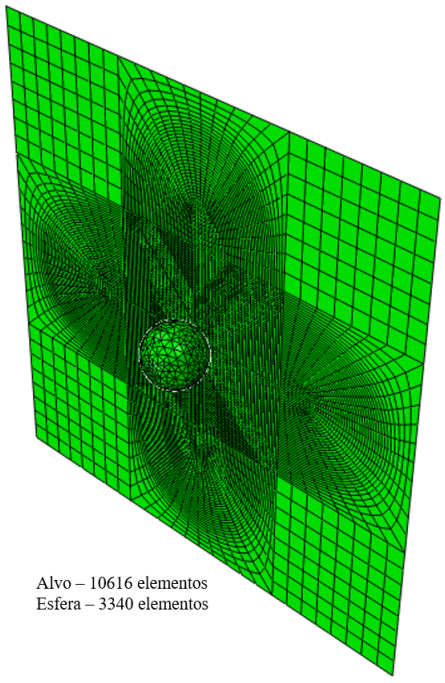


Figura 5.21: Instante inicial do impacto de um projétil de 12.7 mm de diâmetro com alvos de UHMWPE com espessuras variáveis

Espessura de 9.8 mm

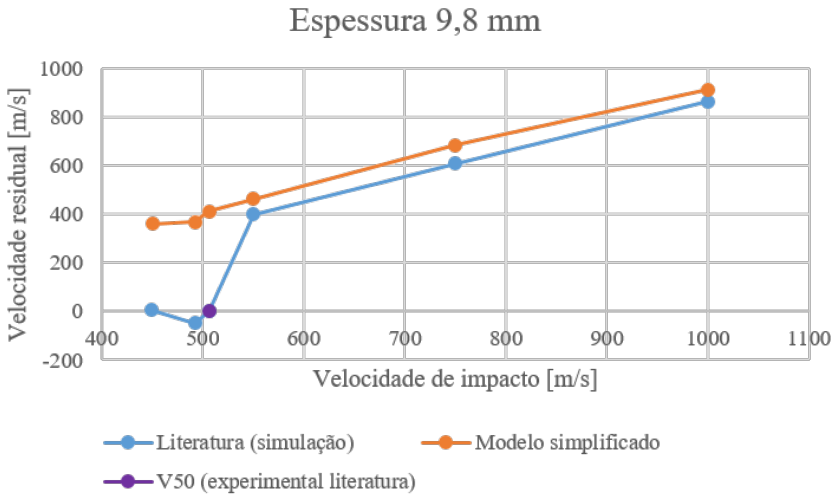


Figura 5.22: Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 9.8 mm[63]

Na figura encontram-se representados os resultados obtidos quando um projétil de 12.7 mm em aço embate num alvo de UHMWPE de espessura 9.8 mm. Até velocidades de impacto de, aproximadamente, 550 m/s, o modelo simplificado apresenta velocidades residuais muito superiores ao expresso na literatura, não definindo nessa gama a velocidade limite balístico. Para velocidades de impacto superiores, os resultados obtidos através do modelo simplificado apresentam uma boa relação com os expressos na literatura.

O ponto de cor roxa no gráfico representa o valor da velocidade limite balístico obtido experimentalmente por Nguyen et al [63].

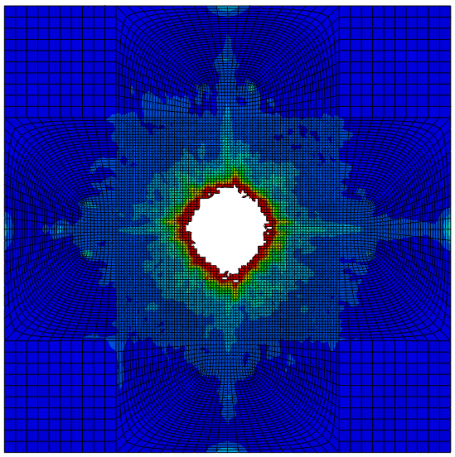


Figura 5.23: Área danificada na sexta camada de um alvo em UHMWPE após colidir com um projétil de diâmetro 12.7 mm a uma velocidade de 1000 m/s

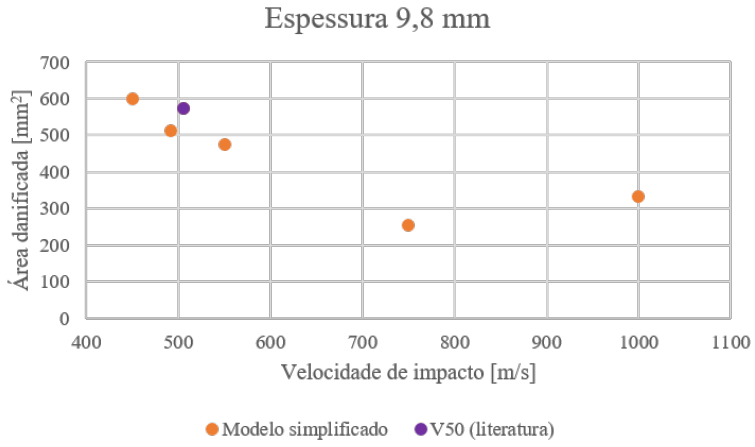


Figura 5.24: Área danificada de um alvo em UHMWPE (espessura 9.8 mm) em função da velocidade de impacto do projétil

Os resultados obtidos para a área danificada de um alvo em UHMWPE com 9.8 mm de espessura encontram-se representados na figura 5.24. Não são referenciados por Nguyen et al. [63] resultados numéricos de área danificada após impacto, contudo, dada a natureza localizada da resposta face a este fenómeno, sabe-se que à medida que a velocidade aumenta, diminui a área danificada, estabilizando eventualmente. Observando a figura, é visível a diminuição da área danificada com o aumento da velocidade de impacto, verificando-se novamente um aumento para uma velocidade de 1000 m/s, o que está consistente com o esperado, sendo, a exceção, o aumento para a maior velocidade testada.

Espessura de 50.4 mm

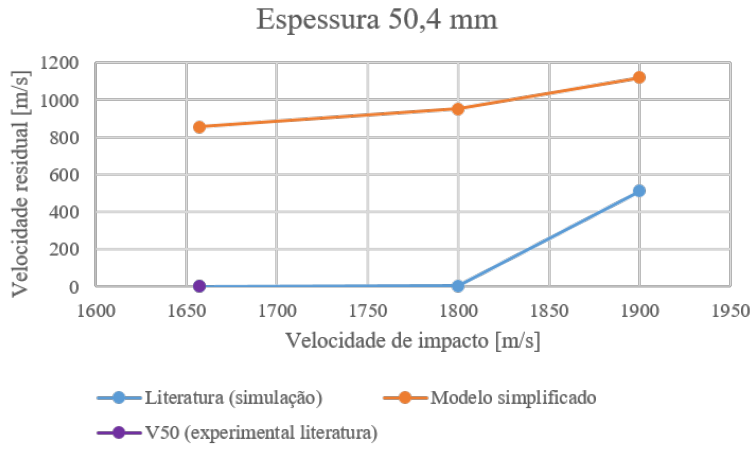


Figura 5.25: Velocidade residual em função da velocidade de impacto do projétil num alvo de UHMWPE de espessura igual a 50.4 mm [63]

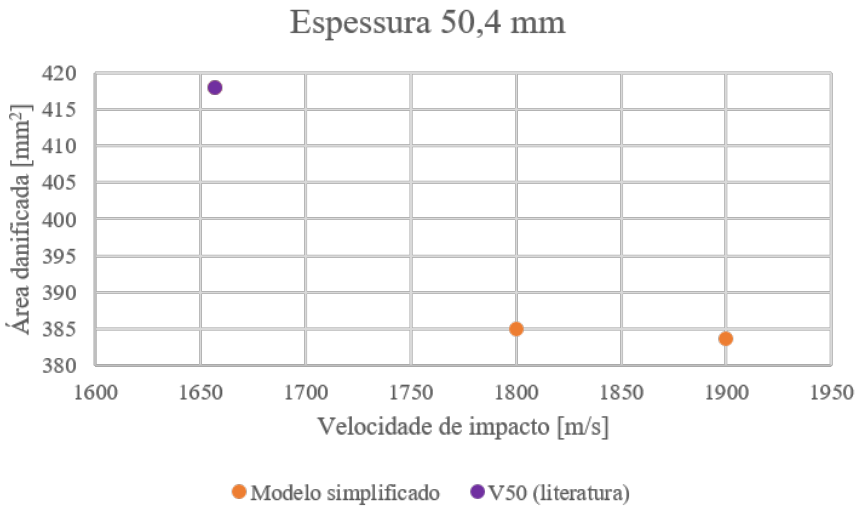


Figura 5.27: Área danificada de um alvo em UHMWPE com espessura 50.4 mm em função da velocidade de impacto

Analisando a figura 5.25, rapidamente se observa que os resultados obtidos através do modelo simplificado são muito díspares do esperado. Podemos, então, concluir que este não se apresenta como sendo uma boa abordagem para espessuras elevadas, algo que pode estar diretamente relacionado com o tipo de elementos selecionados para modelar o alvo.

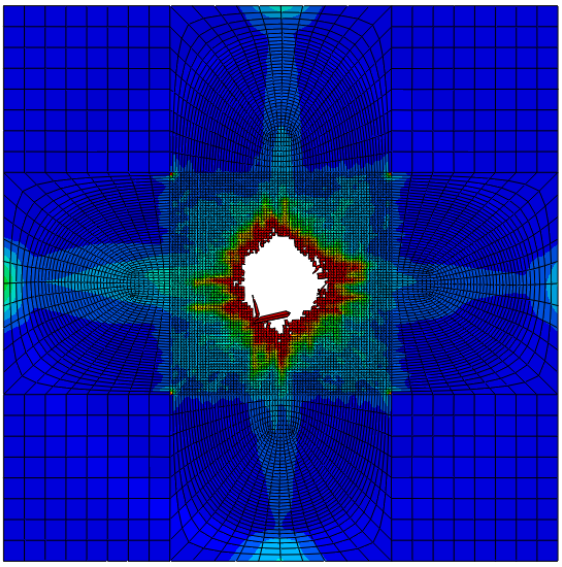


Figura 5.26: Área danificada, na camada 31, de um alvo em UHMWPE com espessura 50.4 mm após sofrer colisão a uma velocidade de 1800 m/s por parte de um projétil de diâmetro 12.7 mm

Tal como na situação anterior não são fornecidos, pelos autores, resultados referentes à área danificada, mas verifica-se uma diminuição da área danificada com o aumento da velocidade de

impacto, o que está de acordo com o previsto.

De seguida são apresentados os resultados obtidos para os alvos que sofrem colisão por parte do projétil de maior dimensão. Mais uma vez, apenas serão apresentados os resultados para os casos de maior e menor espessura, estando os restantes disponíveis no anexo A.

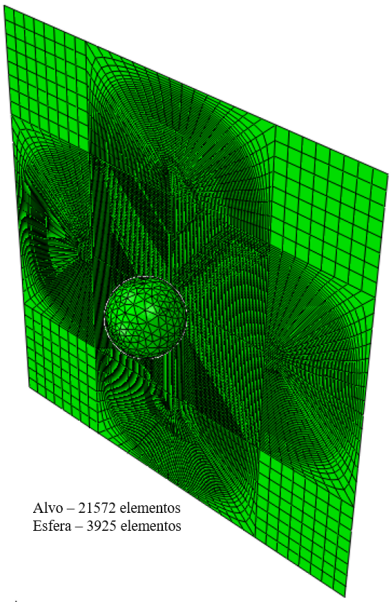


Figura 5.28: Instante inicial do impacto em alvos em UHMWPE de espessura variável por parte de um projétil de diâmetro 20 mm

Espessura de 10 mm

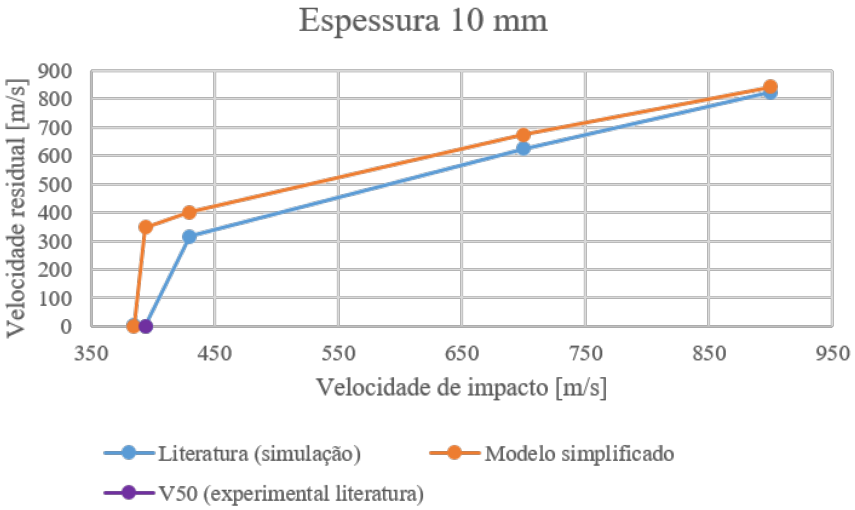


Figura 5.29: Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 10 mm[63]

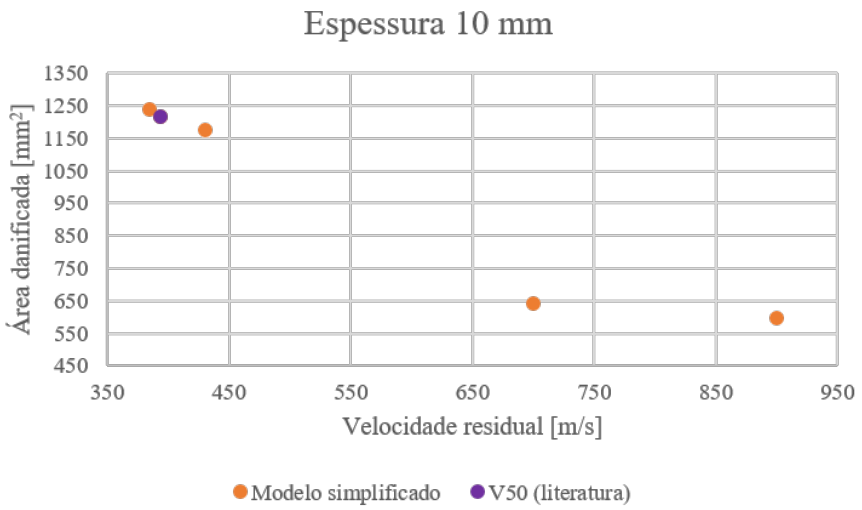


Figura 5.31: Área danificada de um alvo em UHMWPE (espessura 10 mm) em função da velocidade de impacto do projétil

À medida que aumenta a velocidade de impacto do projétil, aumenta também a sua velocidade residual. De um modo geral, o modelo simplificado apresenta boa concordância com os resultados expressos na literatura. A velocidade limite balístico obtida é ligeiramente inferior ao esperado, 384.62 m/s comparativamente aos esperados 394 m/s.

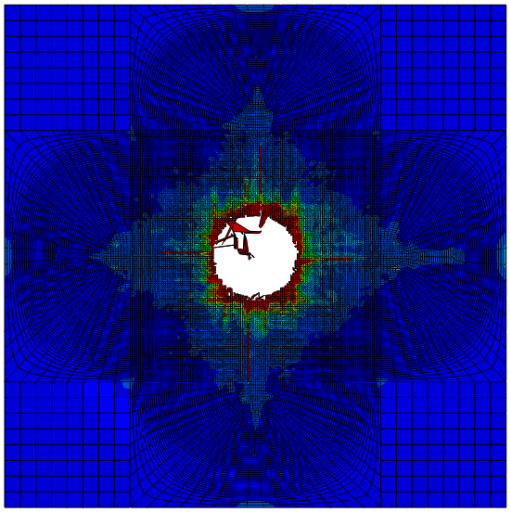


Figura 5.30: Área danificada na terceira camada de um alvo em UHMWPE de espessura 10 mm após sofrer impacto por parte de um projétil a 700 m/s

Exatamente como nos casos do projétil de menor dimensão, não são fornecidos valores de área danificada por Nguyen et al [63]. Contudo, verifica-se novamente a diminuição da área danificada com o aumento da velocidade de impacto e a estabilização da primeira para velocidades de impacto

superiores a 650 m/s, o que está de acordo com o expectável.

Espessura de 76 mm

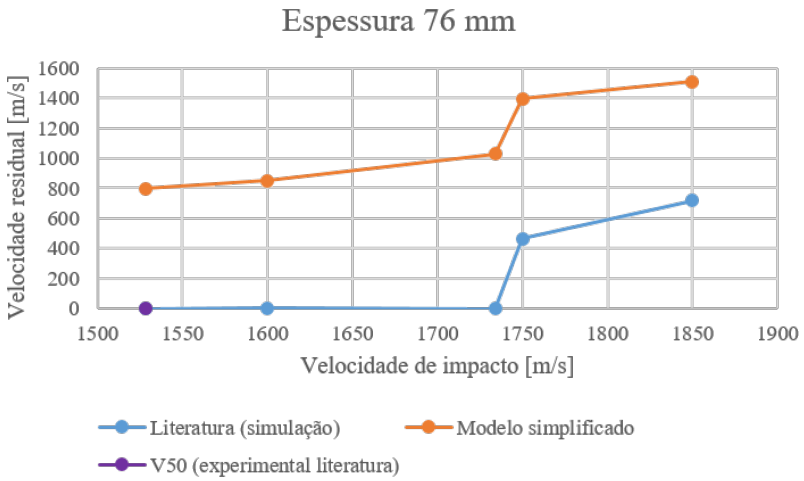


Figura 5.32: Velocidade residual do projétil em função da sua velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 76 mm[63]

Para o caso da maior espessura testada, 76 mm, conclui-se, pela análise da figura 5.32, que os resultados não correspondem ao esperado. Apesar da tendência de aumento da velocidade residual com o aumento da velocidade de impacto se verificar, os resultados obtidos através do modelo simplificado apresentam-se bastante díspares do previsto na literatura. Assim sendo, podemos concluir que este modelo não se apresenta como uma boa abordagem para valores de espessura elevados, no que diz respeito à previsão da velocidade residual do projétil.

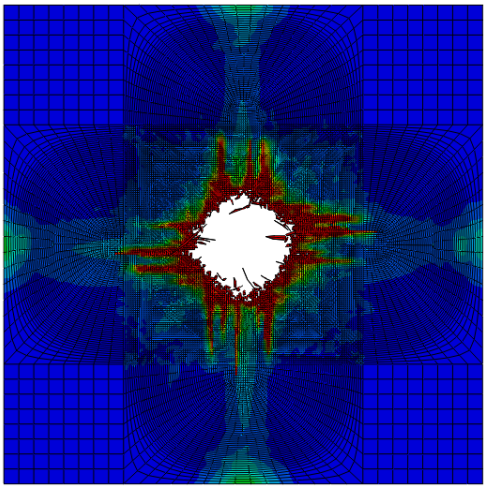


Figura 5.33: Área danificada num alvo de 76 mm de espessura em UHMWPE após sofrer colisão por parte de um projétil à velocidade limite balístico obtida experimentalmente (camada 14)

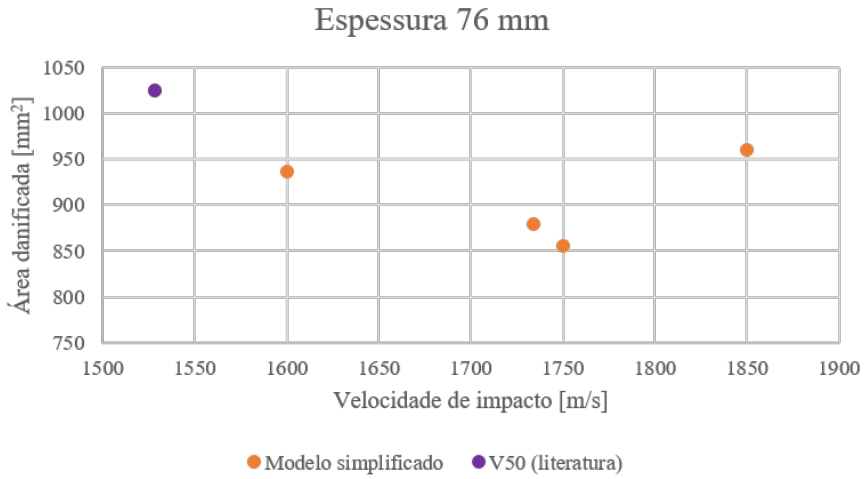


Figura 5.34: Área danificada de um alvo em UHMWPE com 76 mm de espessura em função da velocidade de impacto

Para a situação de maior espessura, também não são fornecidos dados relativos à área danificada após o impacto do projétil. Até a uma velocidade de impacto igual a 1750 m/s, verifica-se uma diminuição da área danificada, aumentando esta novamente para uma velocidade de 1850 m/s. Tirando este aumento para o valor de velocidade de impacto mais elevado, os resultados são consistente com o comportamento dos materiais compósitos.

5.4.1.5 Fibra de vidro e resina epoxídica

Bodepati et al. [19] concentraram-se no estudo do impacto balístico por parte de um projétil macio em alvos de fibra de vidro e resina epoxídica de espessuras 3, 5 e 7 mm.

Efetuaram-se testes experimentais com projéteis em chumbo para ângulos de impacto iguais a 0°, 30°, 45° e 60° numa gama de velocidades entre 395-425 m/s. Nesses testes mediu-se a velocidade de impacto e a velocidade residual do projétil recorrendo a um sistema de infravermelhos [19].

O projétil, de forma pontiaguda, possui um núcleo de chumbo, com diâmetro igual a oito milímetros, e um invólucro em cobre de espessura 0.5 mm. O núcleo foi modelado com elementos sólidos prismáticos de 8 nós e integração reduzida. Para modelar o invólucro utilizaram-se elementos de casca de 4 nós e integração reduzida [19].

Tabela 5.9: Propriedades do invólucro do projétil em cobre [19]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	8.96E-9
E [MPa]	122E3
ν	0.3

Tabela 5.10: Propriedades do núcleo do projétil em chumbo [19]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	11.34E-9
E [MPa]	22.3E3
ν	0.3

O alvo, fixado nas extremidades, possui dimensões 150×150 mm^2 e espessura variável. A camada do FRP é modelada como um material ortotrópico homogéneo com potencial para aguentar degradação progressiva da rigidez devido à rutura das fibras ou da matriz, e também deformação plástica devido às solicitações de corte. O material, dividido em 12, 20 ou 28 camadas, para espessuras de 3, 5 ou 7 mm, respetivamente, foi modelado com elementos de casca quadriláteros de oito nós [19].

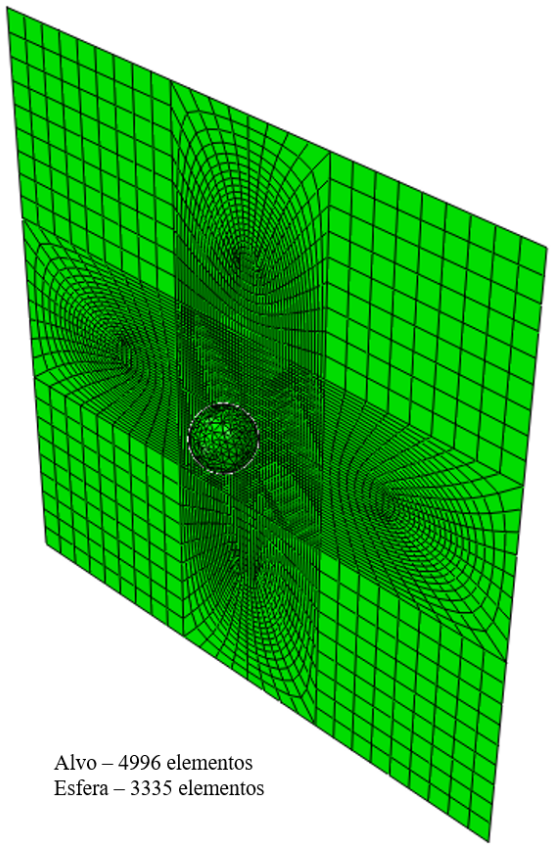


Figura 5.35: Instante inicial do impacto de um projétil em cobre num alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura variável

Tabela 5.11: Propriedades do alvo de fibra de vidro E-Glass em matriz de resina epoxídica [19]

Propriedade	Valor
E_1 [MPa]	25 000
E_2 [MPa]	25 000
ν_{12}	0.12
G_{12} [MPa]	4 000
X_t [MPa]	350
X_c [MPa]	400
Y_t [MPa]	350
Y_c [MPa]	400
S [MPa]	50

Apesar de, na literatura, o projétil estar definido como sendo constituído por um núcleo de chumbo e um invólucro de cobre, foi apenas considerado o núcleo na modelação, ou seja, um diâmetro de 8 mm e um único material. Esta simplificação foi possível, uma vez que os resultados obtidos recorrendo à mesma não são significativamente diferentes daquilo que se obteria caso se tivessem modelado ambos os constituintes [19, 20].

Assumiu-se um ângulo de orientação das camadas do laminado nulo, uma vez que não é feita qualquer referência a este aspeto na literatura.

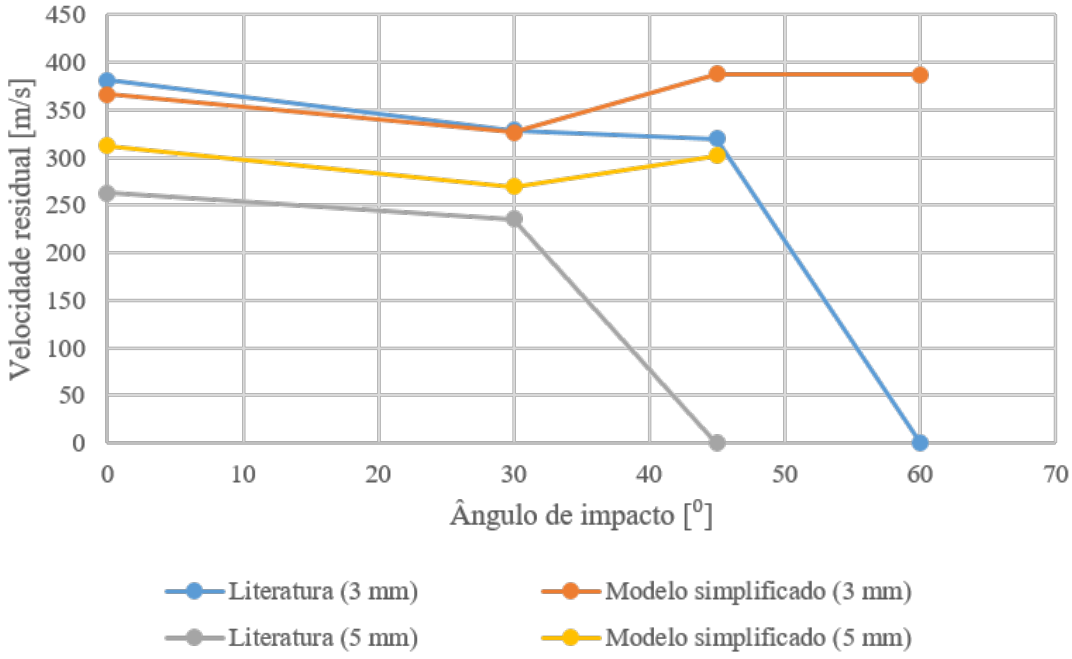


Figura 5.36: Velocidade residual do projétil em função do ângulo de impacto num alvo em E-glass/resina de epóxido [19]

Na figura 5.36, encontra-se representada uma comparação entre os valores de velocidade residual obtidos através do modelo simplificado e os resultados experimentais fornecidos na literatura.

De acordo com Bodepati et al. [19], com um ângulo de impacto de 60° era esperada a imobilização do projétil para o alvo de menor espessura, o que não se verifica nos resultados obtidos através do modelo simplificado. O mesmo se verifica para o alvo de espessura de 5 mm, em que a imobilização do projétil se daria para um ângulo de impacto igual a 45°. Para o caso de maior espessura, previa-se a imobilização do projétil quando o ângulo de impacto fosse nulo, o que também não se verificou, tendo, neste caso, o projétil ficado com uma velocidade residual de 270.73m/s, o que é muito superior ao esperado. Uma vez que a orientação das camadas do laminado não é referenciada na literatura, considerou-se o ângulo igual a 0° para todas os camadas, o que pode estar na origem das diferenças entre os resultados obtidos e os esperados.

Os resultados provenientes do modelo simplificado apresentam uma boa relação com os resultados experimentais para ângulos de impacto de 0° e 30°.

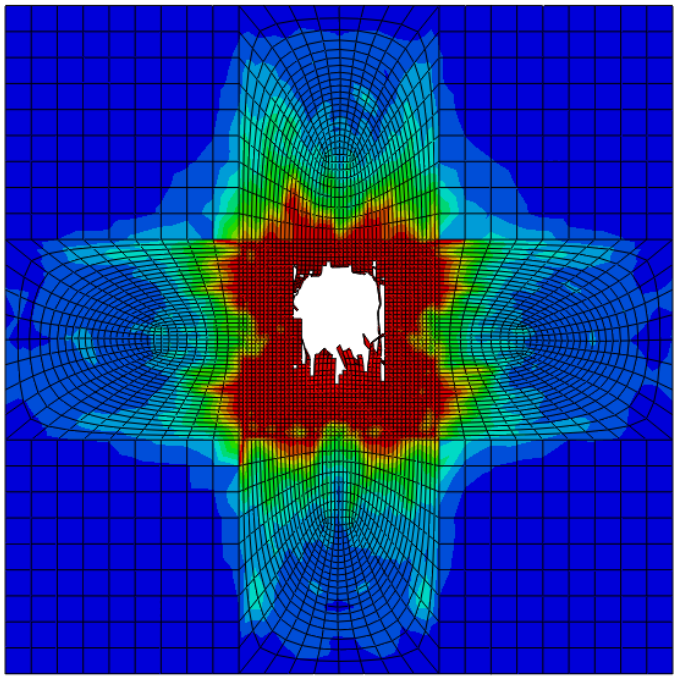


Figura 5.37: Área danificada na décima segunda camada de um alvo em fibra de vidro (espessura 3 mm) após colisão num ângulo de 60° de um projétil com diâmetro 8 mm a uma velocidade de 415 m/s

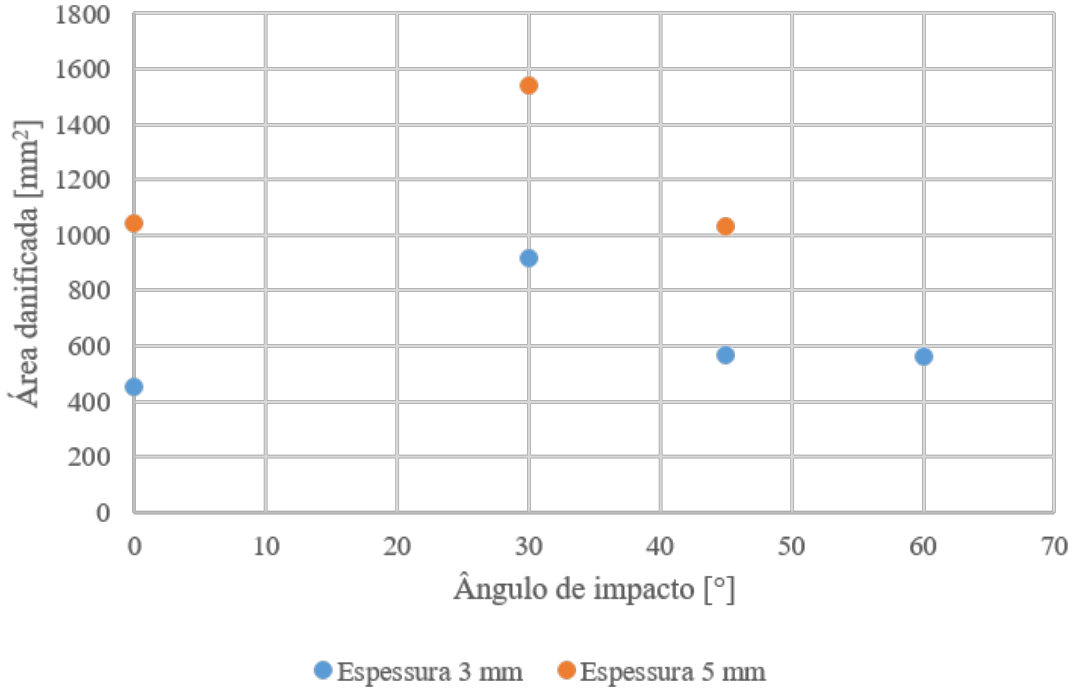


Figura 5.38: Área danificada num alvo em E-Glass/resina de epóxido em função do ângulo de impacto do projétil

Bodepati et al. [19] não fornecem no seu trabalho valores de área danificada, no entanto é esperado que esta seja inferior para um ângulo de impacto nulo do que para situações de ângulos de impacto maiores. Esta situação é verificada para as espessuras de 3 e 5 mm.

5.4.2 Materiais dúcteis

Nesta secção é validado o modelo para os materiais dúcteis. São analisados dois materiais, o aço e o alumínio, dado que são os mais utilizados na indústria. Analisou-se a influência da espessura do alvo na velocidade residual do projétil. Os metais, quando sujeitos a solicitações de impacto, deformam-se formando um cone na parte posterior do alvo, ou ejetando uma porção do painel com o diâmetro do projétil. Tem-se então, que o dano que ocorre nos materiais dúcteis tem sempre uma dimensão aproximada à do diâmetro do projétil que o atinge, não sendo, por isso, apresentados nesta secção gráficos com informação referentes à área danificada [40, 13].

Na zona de impacto, a malha selecionada tem dimensões 0.2 mm nos resultados apresentados nesta secção, uma vez que estavam a existir problemas com a eliminação dos elementos. Todas as outras características mantêm-se inalteradas.

5.4.2.1 Aço Weldox 460 E

Arias et al. [13] estudaram numericamente o comportamento de alvos de aço face ao impacto de projéteis cilíndricos, cónicos e hemisféricos, também em aço.

A montagem experimental foi proposta por Borvik et al. [21] e consiste em lançar, através de uma pistola pneumática, os projéteis diretamente contra um alvo de espessura 12 mm e diâmetro 500 mm, fixo nas extremidades. Os projéteis possuem um diâmetro de 20 mm e massas iguais a 196 g, 195 g e 190 g, para os projéteis de forma cilíndrica, hemisférica e cónica, respetivamente. Durante os testes experimentais são medidas a velocidade de impacto e a velocidade residual do projétil recorrendo a um dispositivo ótico de laser. Foi utilizada uma câmara de alta velocidade que permite gravar o evento de perfuração e estimar a velocidade o projétil durante este processo [13].

O comportamento mecânico do projétil foi definido como elástico e o do alvo está de acordo com o modelo de Johnson-Cook. O contacto entre ambos foi definido recorrendo a um coeficiente de atrito e um algoritmo de contacto normal. O coeficiente de atrito entre as duas partes definiu-se como sendo 0, para o caso dos projéteis cilíndricos e 0.05 para as duas restantes formas, cónica e hemisférica [13].

Tabela 5.12: Propriedades do alvo em aço Weldox 460 E [13]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	7.85E-9
E [MPa]	200 000
ν	0.33
A [MPa]	490
B [MPa]	807
C	0.012
n	0.73
m	0.94
$\dot{\varepsilon}_0$ [s^{-1}]	5E-4
T_{melt} [K]	1800
T_0 [K]	293
D_1	0.075
D_2	1.732
D_3	-0.54
D_4	-0.0123
D_5	0

Para o alvo em aço definiu-se uma malha com elementos CAX4R, elementos axissimétricos de quatro nós e integração reduzida. O projétil foi discretizado recorrendo ao mesmo tipo de elementos [13].

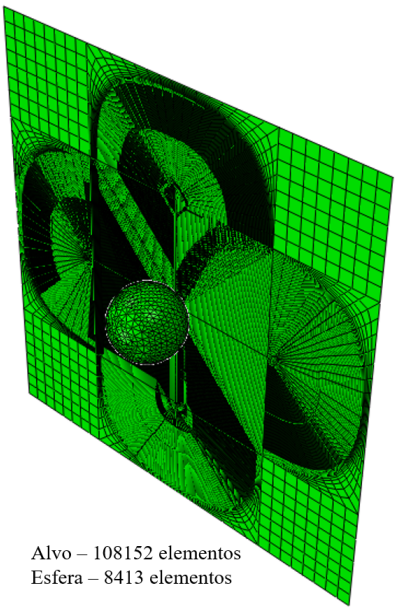


Figura 5.39: Instante inicial do impacto de um projétil em aço num alvo também em aço

Relativamente ao projétil apenas se refere que este é de aço, não sendo referidos quais os valores das propriedades utilizados. Assim, sendo, considerou-se uma densidade, ρ, igual a 7.85E-9 ton/mm^3, um módulo de Young, E, 200 000 MPa e um coeficiente de Poisson, ν, 0.33 [76].

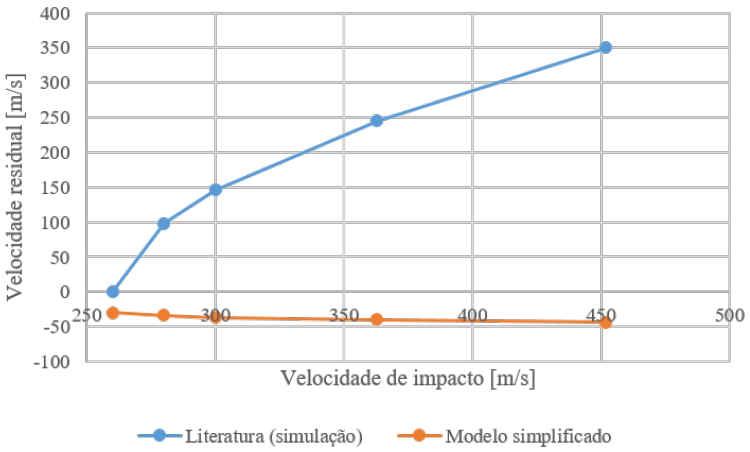


Figura 5.40: Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil em aço num alvo em Weldox 460 E [13]

Na figura 5.40, encontram-se representados os resultados obtidos com o modelo simplificado comparativamente aos referenciados na literatura. Como facilmente se concluí estes são bastante díspares um do outro, sendo que o projétil sofre sempre ricochete por parte do alvo. A origem deste erro pode estar relacionada com a espessura do alvo em estudo, assim como a implementação do material constituinte do mesmo.

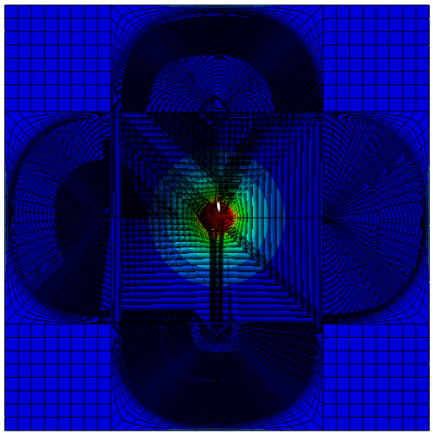


Figura 5.41: Área danificada num alvo de Weldox 460 E, espessura 12 mm, após sofrer colisão por parte de um projétil em aço a uma velocidade de 452 m/s

5.4.2.2 Aço Weldox 700 E

Dey et al. [33] investigaram, experimental e numericamente, a resistência balística de painéis de aço de duas camadas sujeitos a impacto por parte de projéteis cilíndricos e ogivais.

Uma arma pneumática disparou os projéteis nos testes experimentais contra painéis em Weldox 700 E, monolíticos ou de duas camadas, com espessura igual a 12 mm [33].

Tabela 5.13: Propriedades do alvo em aço Weldox 700 E [33]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	7.85E-9
E [MPa]	210 000
ν	0.33
A [MPa]	859
B [MPa]	329
C	0.0115
n	0.579
m	1.071
$\dot{\varepsilon}_0$ [s^{-1}]	5E-4
T_{melt} [K]	1800
T_0 [K]	293
D_1	0.361
D_2	4.768
D_3	-5.107
D_4	-0.0013
D_5	1.333

Os painéis possuíam duas configurações distintas, a primeira com duas camadas de seis milímetros em contacto e a segunda com as duas camadas de igual espessura separadas entre si por 24 mm de ar. Foi também determinada a resistência balística de painéis de espessura 6 mm no mesmo material para efeitos de comparação e completude do trabalho [33].

Aço de ferramentas endurecido foi o material utilizado para fabricar os projéteis cilíndricos e ogivais. Todos eles possuíam massa constante, igual a 197 g, diâmetro 20 mm e dureza 52 HRC [33].

Tabela 5.14: Propriedades do aço endurecido utilizado para o fabrico do projétil [33]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	7.85E-9
E [MPa]	204 000
ν	0.33

A modelação do alvo foi feita recorrendo a uma versão modificada do critério de Johnson-Cook. Foram introduzidos três tipos de critérios de rutura baseados na erosão de elementos para evitar a ocorrência de problemas relacionados com elementos distorcidos. O projétil foi modelado como um material elasto-plástico com endurecimento isotrópico bilinear sem rutura [33].

O tamanho mínimo dos elementos utilizados para discretizar o alvo foi 100 μm na análise do impacto com projéteis cilíndricos. Para o caso dos projéteis ogivais, a malha utilizada foi mais grosseira, 300 μm, uma vez que a rutura do alvo se dá por aumento do orifício de perfuração, uma solução não tão sensível ao tamanho da malha. A malha utilizada na discretização do projétil possuía elementos de dimensões iguais a 1 mm [33].

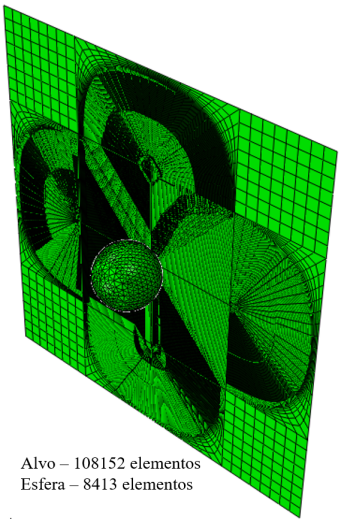


Figura 5.42: Instante inicial do impacto de um projétil em aço endurecido num alvo em Weldox 700 E

Uma vez que o objetivo desta secção é a validação do modelo para materiais dúcteis, a situação em que as camadas do alvo se encontram separadas por ar não foi considerada no presente trabalho. Nesta secção são apenas apresentados os resultados para o alvo monolítico de espessura 6 mm, sendo os resultados das restantes duas configurações analisadas apresentados no anexo A.

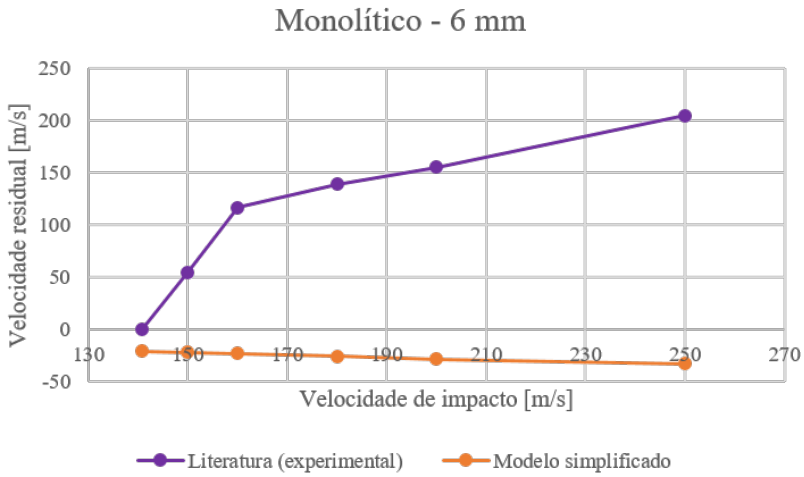


Figura 5.43: Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil num painel monolítico de espessura 6 mm em Weldox 700 E [33]

Para um alvo com uma espessura de 6 mm em Weldox 700 E, a previsão do modelo simplificado é que o projétil de diâmetro 20 mm nunca perfure o painel, sofrendo sempre ricochete por parte deste. De acordo com a figura 5.43, o comportamento previsto pelo modelo simplificado não está de acordo com o referenciado na literatura. Erros na implementação do critério de rutura do material podem estar na origem deste problema, assim como as dimensões da espessura do alvo ou, até mesmo, a forma esférica do projétil.

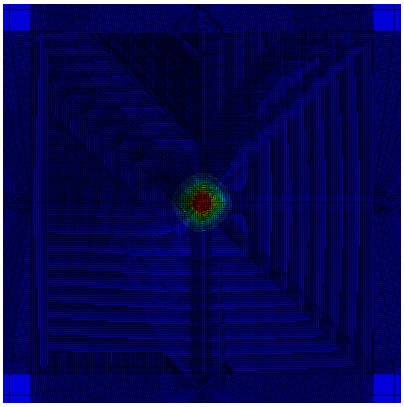


Figura 5.44: Área danificada de um alvo em Weldox 700 E (espessura 6 mm) após sofrer impacto a 160 m/s por parte de um projétil em aço endurecido de diâmetro 20 mm

5.4.2.3 Alumínio 1100-H12

Gupta et al. [40] estudaram a resposta de alvos em alumínio sujeitos a impacto por parte de projéteis em aço de pontas planas, ogivais e hemisféricas. Os projéteis colidiram com diferentes velocidades, num ângulo de 0°, com alvos de espessuras variadas. Os efeitos da forma da ponta, da velocidade de impacto e da espessura do alvo na deformação dos alvos foi estudada.

As experiências foram efetuadas em pratos fabricados em alumínio 1100-H12 de espessuras 0.5, 0.71, 1, 1.5, 2, 2.5 e 3 mm. Os projéteis, em aço, possuíam diâmetro 19 mm e uma massa igual a 52.5 g, colidiram com os alvos com velocidades desde os 33 aos 126 m/s. Uma vez que os projéteis são ocos, para que todos tivessem a mesma massa, tiveram que ser ajustadas as espessuras da parede. Uma pistola pneumática foi utilizada para lançar os projéteis em direção ao alvo com velocidade variada [40].

Os alvos foram modelados como um corpo deformável enquanto que o projétil foi modelado como um corpo rígido com um único ponto de referência para atribuir a massa e a velocidade inicial. O comportamento mecânico do alvo foi descrito segundo o critério de Johnson-Cook [40].

Tabela 5.15: Propriedades do alvo em alumínio 1100-H12 [40]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	2.7E-9
E [MPa]	65762
ν	0.3
A [MPa]	148.361
B [MPa]	345.513
C	0.001
n	0.183
m	0.859
$\dot{\varepsilon_0}$ [s^{-1}]	1
T$_{melt}$ [K]	893
T$_0$ [K]	293
D$_1$	0.071
D$_2$	1.248
D$_3$	-1.142
D$_4$	0.147
D$_5$	0

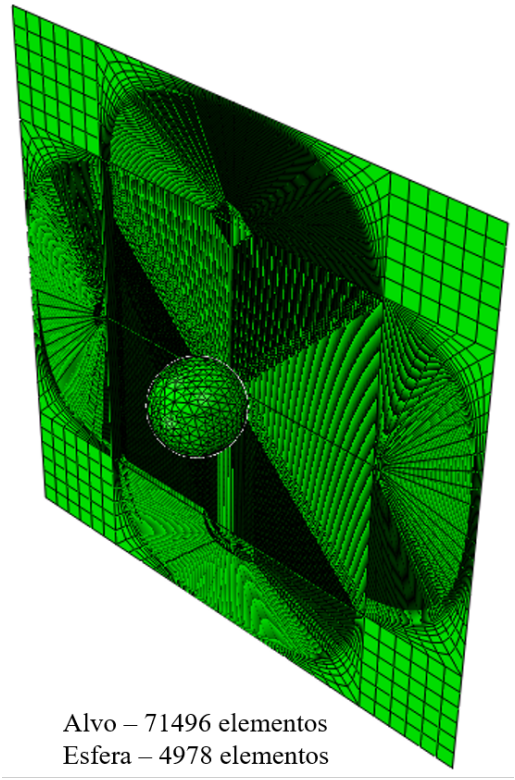


Figura 5.45: Instante inicial do impacto num alvo em alumínio 1100-H12 com espessuras variáveis entre 0.5 e 1 mm

Entre o projétil e o alvo definiu-se contacto superfície-superfície utilizando um algoritmo de contacto cinemático, com o projétil a ser considerada a superfície mestre e o alvo, a escrava. Considerou-se desprezável o efeito da fricção entre o projétil e o alvo [40].

Na discretização utilizaram-se elementos quadriláteros com um único ponto de integração, sendo a densidade de malha mais elevada na zona de impacto do projétil, diminuindo à medida que a distância a esta zona aumenta [40].

Apenas é referido que o projétil é em aço, não sendo referidos quais os valores das propriedades utilizados. Assim, sendo, considerou-se uma densidade, ρ, igual a 7.85E-9 ton/mm^3, um módulo de Young, E, 210 000 MPa e um coeficiente de Poisson, ν, 0.3 [58].

Apesar de Gupta et al. [40] terem analisado alvos de sete espessuras diferentes, devido ao esforço computacional necessário, neste trabalho optou-se por estudar apenas as três espessuras de menor dimensão. Nesta secção são apresentados os resultados para o caso do alvo de espessura 0.5 mm, sendo os casos de espessura 0.71 e 1 mm apresentados no anexo A.

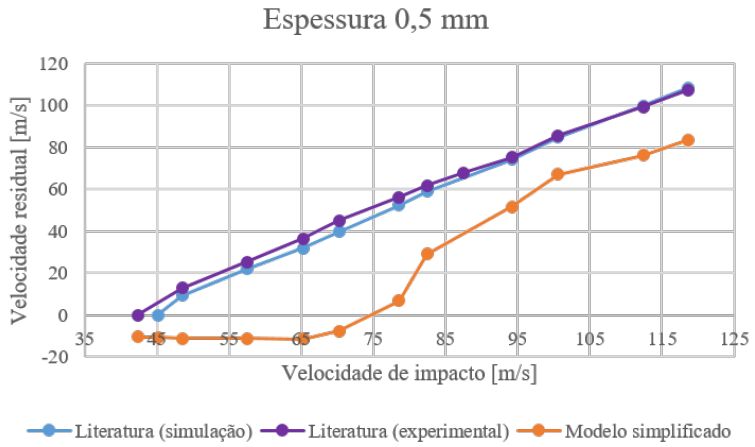


Figura 5.46: Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil num alvo em alumínio 1100-H12 de espessura 0.5 mm [40]

Analisando a figura 5.46, são notáveis algumas discrepâncias entre os resultados esperados de acordo com a literatura e os obtidos recorrendo ao modelo simplificado. O modelo simplificado prevê a penetração do alvo para valores de velocidade mais elevados, cerca de 40-45 m/s superior ao esperado. Para valores de velocidade na gama dos 95-120 m/s, os resultados obtidos recorrendo ao modelo simplificado apresentam-se mais próximos do referenciado na literatura, revelando uma limitação da abordagem apresentada para valores baixos de velocidade, tal como se verificou para os materiais compósitos. Para velocidades mais elevadas, os resultados apresentam-se mais satisfatórios, sendo ainda algo distantes do previsto. A forma do projétil utilizada neste estudo pode estar relacionada com as diferenças observadas, assim como a implementação do critério de rutura do material.

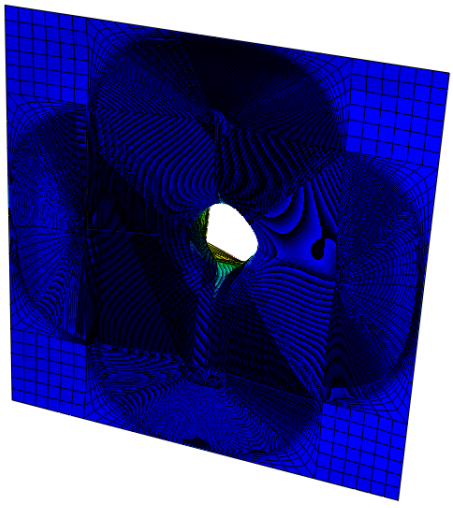


Figura 5.47: Área danificada num alvo de espessura 0.5 mm em alumínio 1100-H12 após sofrer impacto por parte de um projétil a 112.43 m/s

5.4.3 Materiais cerâmicos

A seguinte secção apresenta a validação do modelo com elementos de casca para materiais cerâmicos. Analisaram-se diferentes materiais recorrendo a diversos critérios e são apresentados os resultados referentes à velocidade residual do projétil e área danificada do alvo.

Devido à maneira como foi implementado o material cerâmico no *Abaqus*, não é possível visualizar o dano na camada do mesmo. A rotina implementada com o critério JH-2 apenas apresenta a variável de dano na camada cerâmica para algumas situações. Por esta razão não serão apresentados exemplos do dano sofrido por esta camada, uma vez que o software não fornece dados acerca deste parâmetro.

Encontra-se disponível, no anexo B, parte do ficheiro de *input* utilizado na definição dos materiais cerâmicos. Os valores expressos para as propriedades desse exemplo dizem respeito ao carboneto de silício.

5.4.3.1 Carboneto de boro e Kevlar®-49

Shokrieh et al. [70] estudaram o comportamento de um painel balístico, de espessura constante 10 mm, sujeito a impactos balísticos. O painel era constituído dois materiais distintos, a primeira camada composta por um cerâmico, carboneto de boro, e a segunda por um compósito, Kevlar-49®.

O painel considerado tem forma retangular com duas camadas e dimensões 40×40 mm. Como interface entre as duas camadas existe um adesivo de silicone. O projétil, em aço, é um cilindro com ponta cónica com 30 e 10 mm de comprimento e diâmetro, respetivamente [70].

Tabela 5.16: Propriedades do projétil em aço [70]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	7.89E-9
E [MPa]	202 000
ν	0.3

Para se determinar a espessura ótima dos painéis cerâmicos e compósitos foram consideradas duas espessuras distintas. Para o primeiro caso, uma espessura de 8 mm para o cerâmico e 2 mm para o compósito, perfazendo os 10 mm totais. No segundo caso, a espessura considerada foi 5 mm para cada um dos materiais. Baseando-se no modelo de Heterington, as espessuras ótimas são 6.9 mm para o cerâmico e 3.1 mm para o compósito, tendo sido esta a considerada no decorrer deste trabalho [70].

No processo de penetração ocorre contacto entre o projétil e o cerâmico, o projétil e o compósito e entre o cerâmico e o compósito. O tipo de contacto considerado foi o de erosão [70].

Ambas as camadas do alvo são modeladas com elementos sólidos uniformes de oito nós, enquanto que o projétil é modelado com elementos sólidos tetraédricos de seis nós [70].

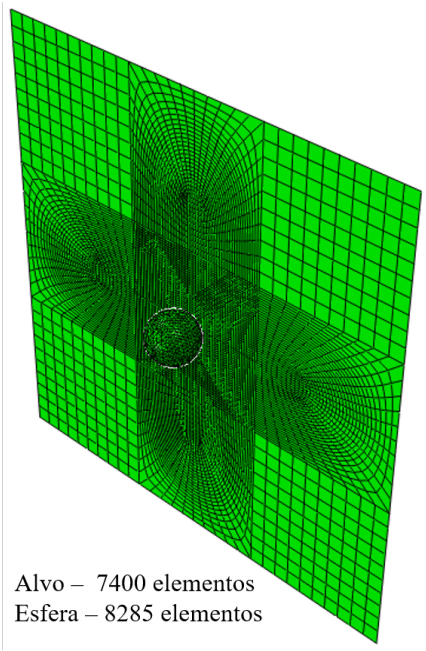


Figura 5.48: Instante inicial do impacto de um projétil em aço num alvo em carboneto de boro e Kevlar®

Utilizou-se a teoria clássica dos laminados para determinar as propriedades do material compósito, uma vez que o software utilizado, Ansys/Ls-dyna, não permite a introdução dessas propriedades na sua forma mais comum [70]. Dada esta situação, as propriedades do compósito e do cerâmico foram obtidas a partir de outras referências literárias e da biblioteca disponível no software Autodesk Helius [14].

Tabela 5.17: Propriedades do compósito Kevlar-49®/resina de epóxido [70, 14]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	1.382E-9
E_1 [MPa]	75 842
E_2 [MPa]	5516
ν_{12}	0.34
G_{12} [MPa]	2068
G_{13} [MPa]	2068
G_{23} [MPa]	1542
X_t [MPa]	1379
X_c [MPa]	276
Y_t [MPa]	29.6
Y_c [MPa]	138
S [MPa]	62

Tabela 5.18: Propriedades do carboneto de boro (JH-2) [48, 44, 32]

Propriedade	Valor
ρ_0 [ton/mm^3]	2.51E-9
G [MPa]	197 000
A	0.927
B	0.70
C	0.005
M	0.85
N	0.67
$\dot{\varepsilon}_0$ [s^{-1}]	1
ε^f_{min}	0.13
ε^f_{max}	0.11
T [MPa]	260
σ^i_{max} [MPa]	12 500
σ^f_{max} [MPa]	3800
HEL [MPa]	19 000
P_{HEL} [MPa]	8710
β	1
K_1 [MPa]	233 000
K_2 [MPa]	-593 000
K_3 [MPa]	2 800 000
D_1 [MPa]	0.001
D_2 [MPa]	0.5

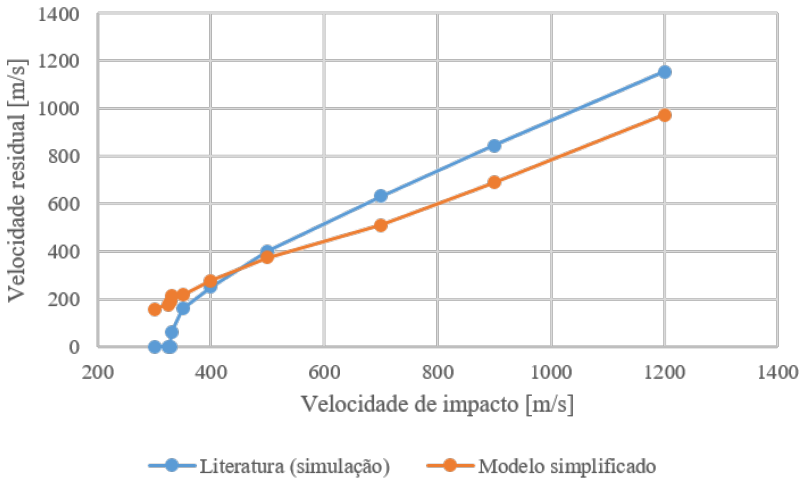


Figura 5.49: Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto num alvo em carboneto de boro/Kevlar® [70]

Na figura 5.49, encontram-se representados os resultados obtidos para a velocidade residual do projétil utilizando o modelo simplificado. Comparando esses resultados com os providenciados na literatura, podemos afirmar que existe uma boa relação entre estes, conseguindo, o modelo simplificado, exprimir o comportamento deste material face ao impacto balístico.

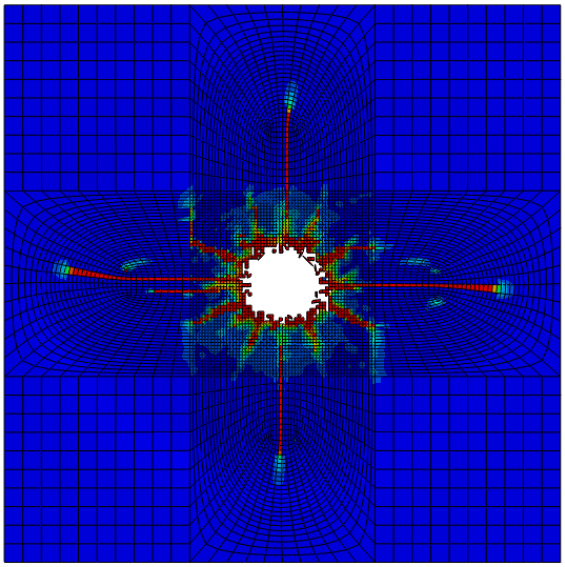


Figura 5.50: Área danificada de um alvo em carboneto de boro/Kevlar® após sofrer colisão de um projétil em aço a 350 m/s (camada 2)

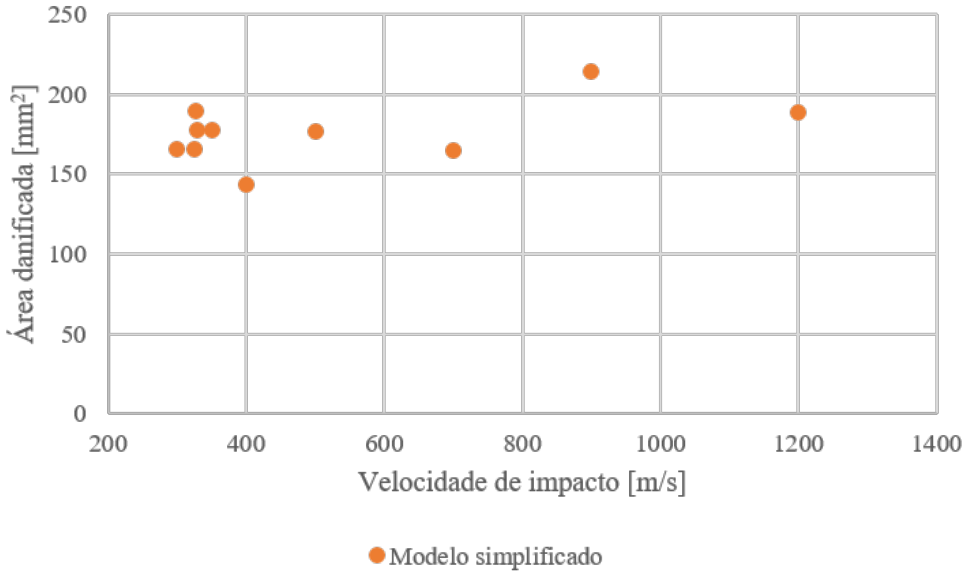


Figura 5.51: Área danificada num alvo em carboneto de boro/Kevlar® em função da velocidade de impacto de um projétil em aço

Os valores de área danificada obtidos para o caso do impacto de um projétil em tungsténio num alvo de carboneto de boro e Kevlar® encontram-se representados na figura 5.51. Analisando a mesma, retém-se que os valores de área danificada obtidos oscilam em torno dos 200 mm^2, apresentando uma distribuição relativamente aleatória, o que torna difícil que se retirem conclusões concretas acerca de como se danifica o alvo.

5.4.3.2 Alumina 99.5% e Twaron®

A penetração de projéteis cilíndricos em alvos constituídos por materiais cerâmicos e compósitos foi estudada por Feli et al. [36].

O projétil em tungsténio tem um diâmetro de 10 mm, um comprimento 30 mm e uma massa igual a 41.7 g. O alvo tem 40mm de espessura e um diâmetro de cinquenta milímetros. Está dividido em dois constituintes: o cerâmico, alumina 99.5%, e o compósito, Twaron®. Cada um dos constituintes possui uma espessura de 20 mm, ficando o alvo com uma espessura total igual a quarenta milímetros. O compósito, colocado na parte traseira do alvo divide-se em 50 camadas, cada uma delas com uma espessura igual a 0.4 mm [36].

Para descrever o comportamento do projétil em tungsténio foi utilizado o modelo de Johnson-Cook, para descrever o comportamento da alumina utilizou-se o modelo material de Johnson-Holmquist e, por fim, foi utilizado o critério de Hashin para definir a rutura do material compósito [36].

Tabela 5.19: Propriedades do compósito Twaron [36]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	1.23E-9
E_1 [MPa]	20 440
E_2 [MPa]	8900
ν_{12}	0.31
G_{12} [MPa]	1640
G_{13} [MPa]	1640
G_{23} [MPa]	3030
X_t [MPa]	1145
X_c [MPa]	1145
Y_t [MPa]	130
Y_c [MPa]	650
S [MPa]	340

Tabela 5.20: Propriedades da alumina 99.5% [36, 32]

Propriedade	Valor
ρ_0 [ton/mm^3]	3.7E-9
G [MPa]	90 160
A	0.93
B	0.31
C	0
M	0.6
N	0.6
$\dot{\varepsilon_0}$ [s^{-1}]	1
ε^f_{min}	0.06
ε^f_{max}	0.08
T [MPa]	275
σ^i_{max} [MPa]	270 633
σ^f_{max} [MPa]	3800
HEL [MPa]	19 000
P_{HEL} [MPa]	1460
β	1
K_1 [MPa]	130 950
K_2 [MPa]	0
K_3 [MPa]	0
D_1 [MPa]	0.005
D_2 [MPa]	1

Para todas as superfícies em contacto foi considerada uma interação superfície-superfície durante o processo de penetração. O coeficiente de atrito considerado entre as camadas do compósito é 0.3, enquanto que o considerado nos pares projétil-cerâmico e cerâmico-compósito é igual a 0.28 [36]. Elementos de casca axissimétricos, quadráticos de 4 nós, tendo o eixo dos yy como eixo de simetria foram utilizados na discretização, tendo o projétil e o componente cerâmico sido modelados com elementos de 0.5 mm e o compósito com elementos de 0.5×0.2 mm^2 de dimensão [36].

Apesar do projétil ter sido modelado de acordo com o critério de Johnson-Cook, os resultados apresentados referem-se a uma modelação considerando apenas o comportamento elástico do tungsténio, como já tinha sido referido na secção 5.2.

Tabela 5.21: Propriedades do tungsténio utilizado para o fabrico do projétil [36]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	1.76E-8
E [MPa]	314 000
ν	0.29

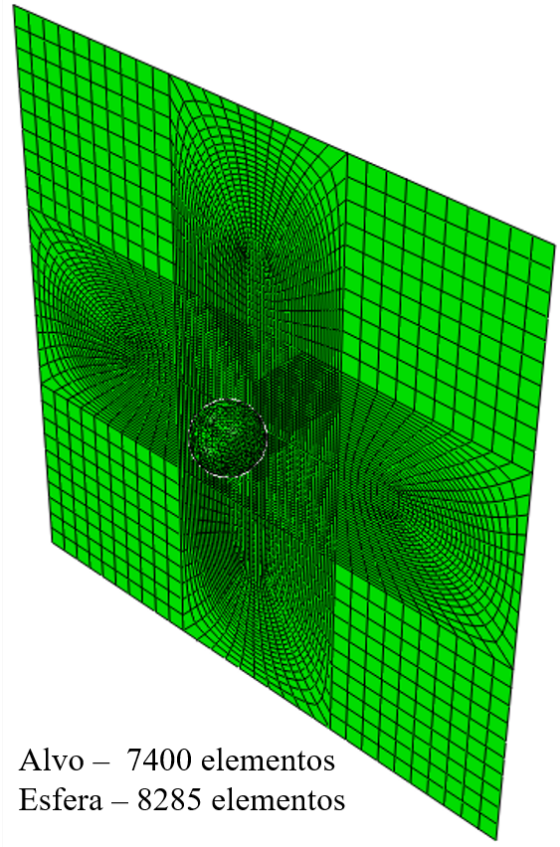


Figura 5.52: Instante inicial do impacto de um projétil em tungsténio num alvo em alumina 99.5% e Twaron®

O valor da tensão intacta máxima não é dado, assim sendo, foi feita uma estimativa recorrendo à expressão 5.14, tendo sido obtido o valor de 270 633 MPa, utilizado na modelação.

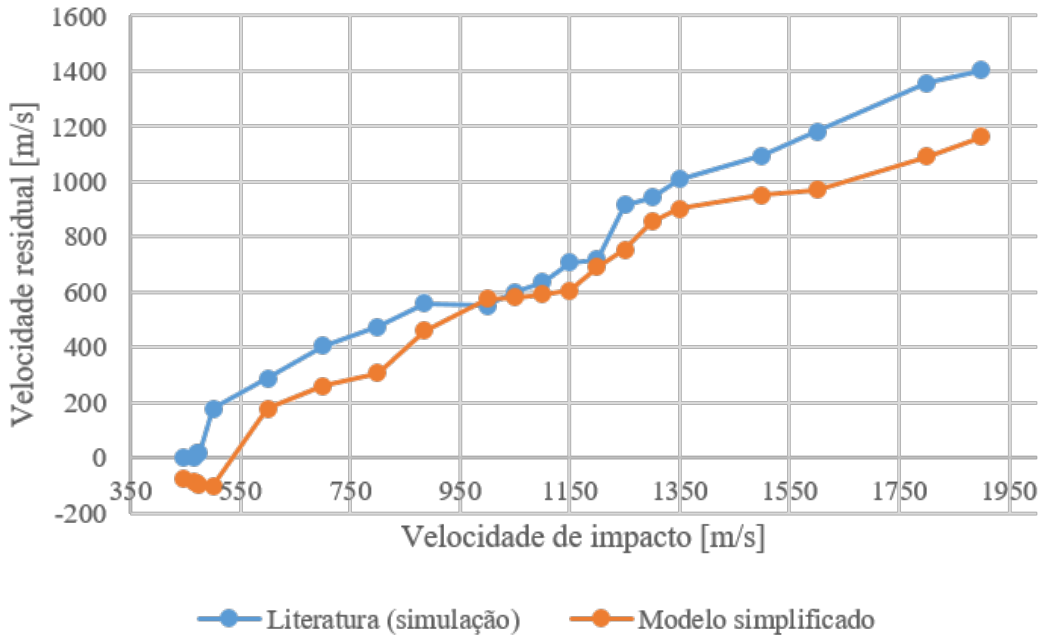


Figura 5.53: Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto após colisão com um alvo em alumina 99.5% e Twaron® [36]

Analisando a figura 5.53 é notável uma boa relação entre os resultados obtidos com o modelo simplificado e os expressos na literatura, sendo estes praticamente coincidentes numa gama de velocidades de impacto entre os 950 e os 1150 m/s.

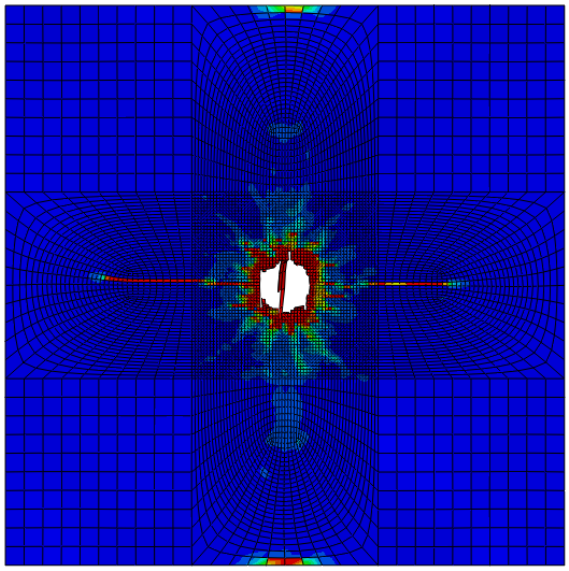


Figura 5.54: Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/Twaron® após sofrer colisão de um projétil em tungsténio a 445 m/s (camada 27)

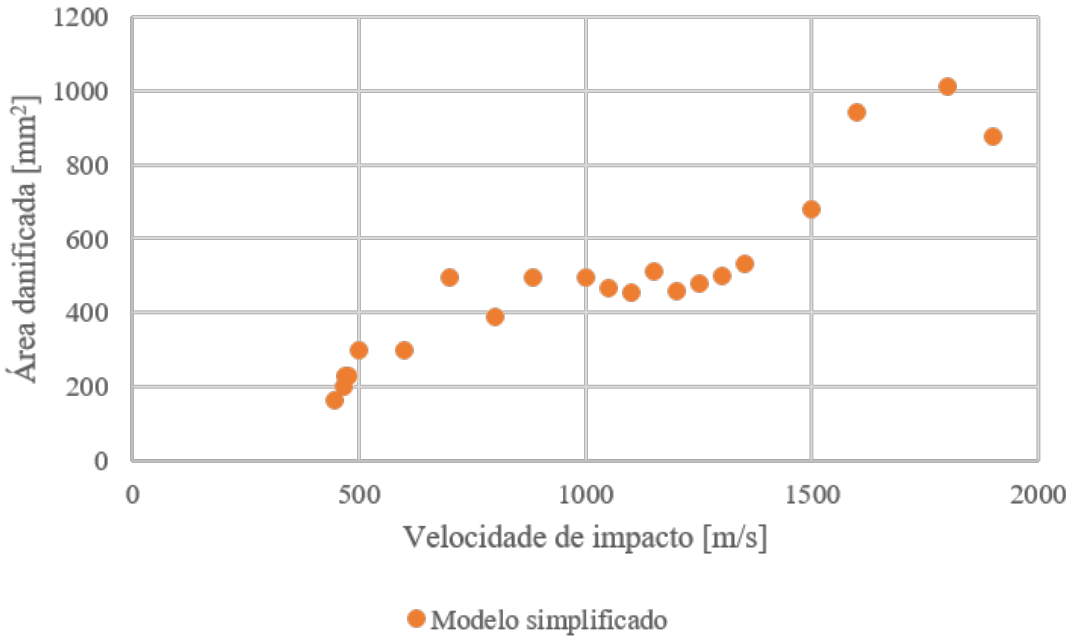


Figura 5.55: Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/Twaron® em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio

A área danificada do alvo em alumina 99.5%/Twaron® em função da velocidade de impacto encontra-se representada na figura 5.55. É de referenciar um aumento gradual da área danificada que acompanha o aumento da velocidade de impacto. O aumento da área danificada no alvo pode estar relacionado com o facto do cerâmico sofrer rutura de forma mais extensa quando sofre impacto por parte do projétil a velocidades mais elevadas, provocando também uma maior erosão do mesmo.

5.4.4 Alumina 99.5% e alumínio 5083-H116

Um modelo numérico para o estudo do impacto de um projétil em tungsténio numa armadura de alumina/alumínio foi desenvolvido por Chi et al [25]. Este modelo foi verificado através da comparação com resultados experimentais já existentes.

Tabela 5.22: Propriedades do projétil em tungsténio [36, 25]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	1.76E-8
E [MPa]	314 000
ν	0.29

Os alvos foram modelados como discos circulares, fixados na periferia, com um raio igual a 100 mm, de modo a que a razão entre o diâmetro e a espessura nunca seja inferior a dez. O projétil

considerado possuía um diâmetro de 20 mm, comprimento 61.5 mm e qualidades perfurantes. Foi desprezada a existência de atrito entre as duas partes [25].

O modelo constitutivo proposto por Johnson e Holmquist, o JH-2, foi usado para descrever o comportamento da alumina, enquanto que o alumínio foi modelado de acordo com o critério de Johnson-Cook [25].

Após realização a testes à sensibilidade da malha, definiu-se que o tamanho de elemento usado corresponderia a 1/12 do diâmetro do projétil. Os elementos utilizados no alvo possuem a mesma dimensão na área central, sendo que as suas dimensões vão aumentando à medida que se aproximam da extremidade do mesmo [25].

Tabela 5.23: Propriedades da alumina 99.5% [25, 36, 32]

Propriedade	Valor
ρ_0 [ton/mm^3]	3.89E-9
G [MPa]	152 000
A	0.88
B	0.28
C	0.007
M	0.6
N	0.64
$\dot{\varepsilon}_0$ [s^{-1}]	1
ε^f_{min}	0.06
ε^f_{max}	0.08
T [MPa]	275
σ^i_{max} [MPa]	2 353 987
σ^f_{max} [MPa]	19 000
HEL [MPa]	19 000
P_{HEL} [MPa]	1460
β	1
K_1 [MPa]	231 000
K_2 [MPa]	-160 000
K_3 [MPa]	2 774 000
D_1 [MPa]	0.01
D_2 [MPa]	0.7

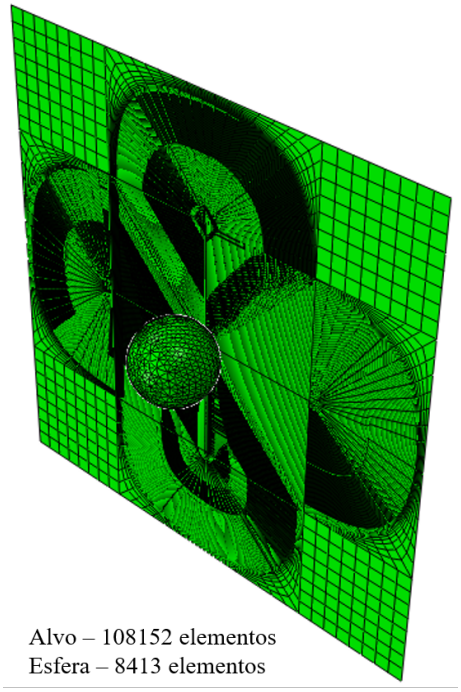


Figura 5.56: Instante inicial do impacto de um projétil em tungsténio num alvo em alumina e alumínio

Tabela 5.24: Propriedades do alumínio 5083-H116 [32, 25]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	2.7E-9
E [MPa]	70 000
ν	0.33
A [MPa]	167
B [MPa]	596
C	0.001
n	0.551
m	0.859
$\dot{\varepsilon_0}$ [s^{-1}]	1
T_{melt} [K]	900
T_0 [K]	300
D_1	0.0261
D_2	0.263
D_3	-0.349
D_4	0.247
D_5	16.8

No modelo simplificado, o projétil encontra-se definido como sendo um material apenas elástico, contudo Chi et al. [25] não apresentam o valor do módulo de Young e do coeficiente de Poisson do material. Assim sendo, consideraram-se os valores fornecidos por Feli et al [36]. O valor de E e de ν utilizado para o alumínio foram retirados do software CES EduPack, tendo sido selecionado o alumínio 5083-H112, uma vez que não se encontrava listado o 5083-H116. Relativamente às propriedades da alumina, verifica-se a mesma situação pelo que os valores de σ_{HEL} e P^{HEL} utilizados na modelação são também os utilizados no trabalho de Feli et al [36]. O valor da tensão intacta máxima foi novamente estimado recorrendo à equação 5.14 [32, 36].

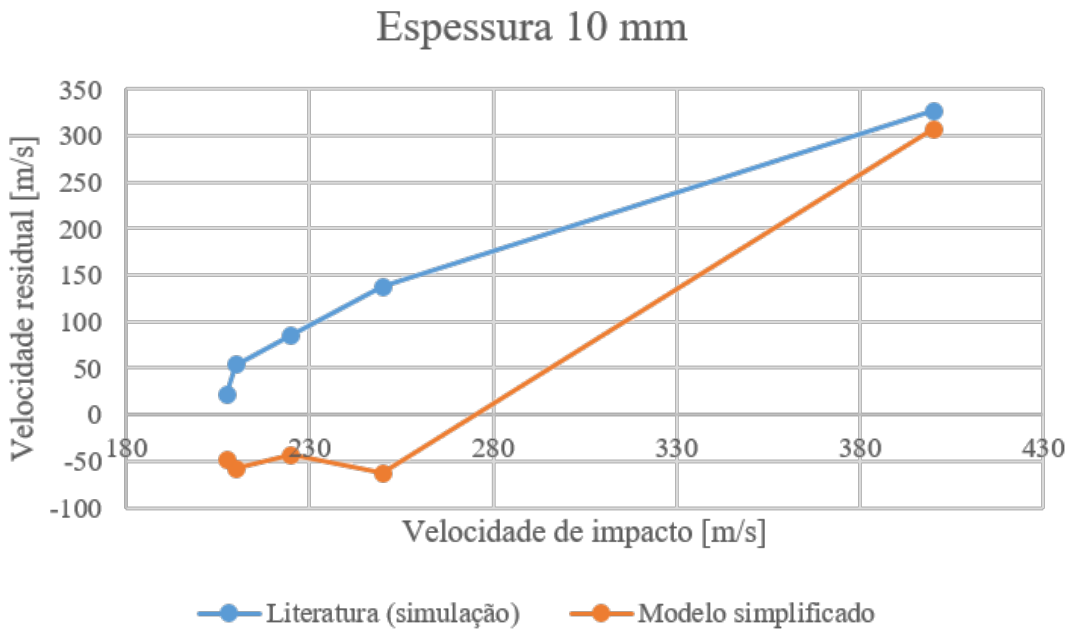


Figura 5.57: Velocidade residual do projétil em função da velocidade de impacto após colidir com um alvo em alumina/alumínio, de espessura 10 mm [25]

Na figura 5.57 encontram-se representados os resultados para a velocidade residual do projétil obtidos com o modelo estudado e os existentes na literatura. Comparando as duas situações, conclui-se que o modelo em análise prevê um valor de velocidade limite balístico superior ao esperado de acordo com Chi et al [25]. No entanto, para velocidades mais elevadas, aproximadamente 400 m/s, os valores obtidos pelo modelo simplificado apresentam uma boa concordância com os resultados expressos na literatura.

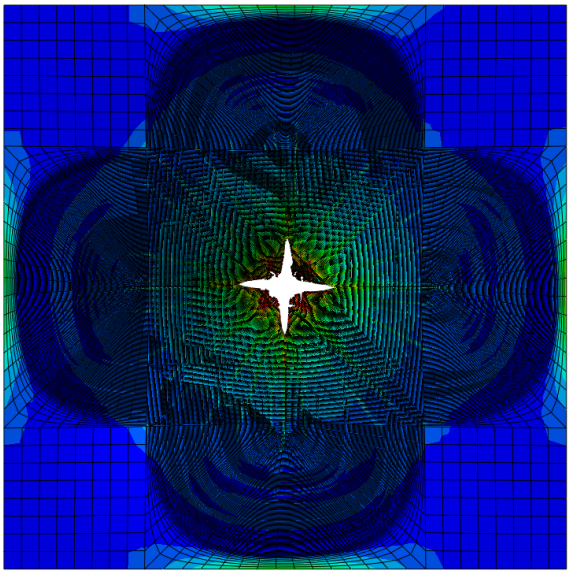


Figura 5.58: Área danificada, na camada de alumínio, de um alvo de espessura total 10 mm, após sofrer colisão por parte de um projétil a 250 m/s

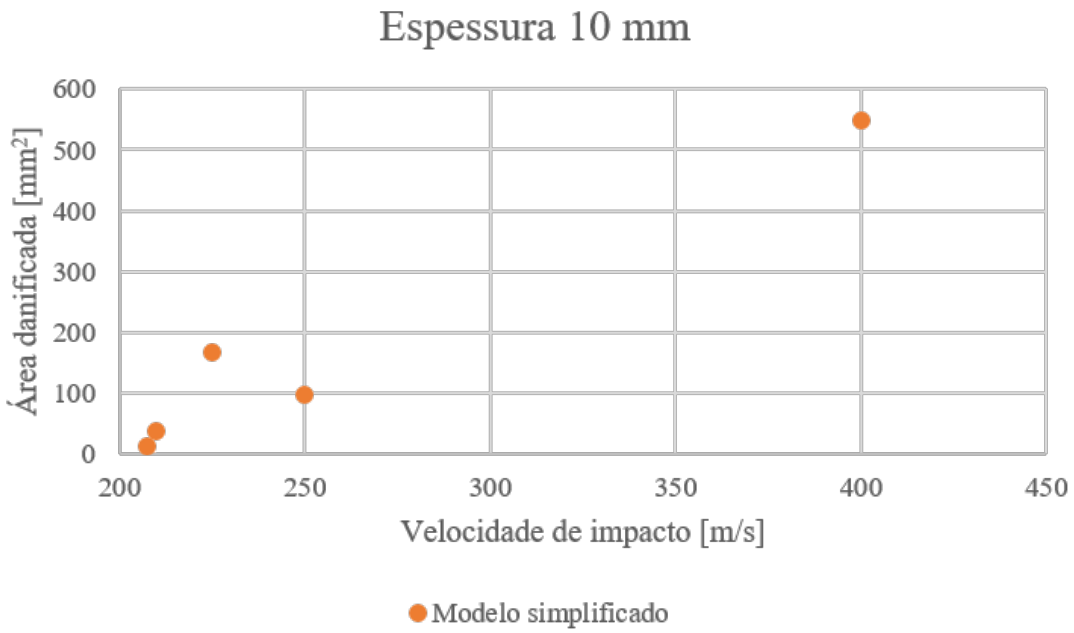


Figura 5.59: Área danificada de um alvo,e espessura total 10 mm, em função da velocidade de impacto de um projétil

Com o aumento da velocidade de impacto, assiste-se também a um aumento da área danificada, sofrendo esta um decréscimo para uma velocidade de impacto de 250 m/s, voltando novamente a

aumentar quando o alvo sofre colisão por parte do projétil a uma velocidade de 400 m/s. Uma possível explicação para o decréscimo da área danificada pode ser o modo como o material dúctil se deforma, obtendo assim um menor valor do que o anterior. No entanto, para valores de velocidade mais elevadas, esse fator não se apresenta como sendo significativo.

5.5 Discussão

Analisando os resultados obtidos na validação do modelo para materiais compósitos, conclui-se que, para espessuras até 20 mm, este apresenta bons resultados. Para espessuras superiores, os resultados obtidos apresentam uma boa relação com o esperado apenas para velocidades de impacto elevadas, na ordem dos 1000 m/s. A velocidade limite balístico prevista com recurso ao modelo simplificado é, geralmente, superior ao reportado na literatura, tornando este modelo numa abordagem conservadora relativamente a este parâmetro.

Relativamente à variação do ângulo de impacto, obtiveram-se bons resultados para ângulos até 30°, sendo que para o caso do ângulo de impacto igual a 45°, o modelo apresentou alguma instabilidade. Podemos confirmar esta situação analisando as figuras 5.11 e 5.36. Na primeira, os valores obtidos encontram-se muito próximos do referenciado na literatura, enquanto que na segunda os resultados do modelo simplificado são, para o caso de espessura 5 mm, aproximadamente, três vezes superiores ao esperado.

De um modo geral, os resultados obtidos para a área danificada apresentam um valor máximo para a velocidade limite balístico e uma consequentemente diminuição que acompanha o aumento da velocidade de impacto, o que está de acordo com o esperado. No entanto, apenas nos casos de fibra de carbono em matriz de resina epoxídica e Kevlar®/PVB é que existe um termo de comparação que permite avaliar se os valores obtidos se encontram, ou não, próximo daquilo que se encontra referenciado. Assim sendo, consideram-se estes resultados inconclusivos, não podendo confirmar que o modelo captura de forma rigorosa este fenómeno.

Ao longo dos testes realizados verificaram-se alguns problemas de malha não representando, por vezes, o correto comportamento das fibras. Ocorrem casos em que ocorre dano nas fibras nas extremidades do painel e ainda situações em que estas sofrem danos extensos, mas ainda não apresentam rutura. As fibras são materiais frágeis, logo não sustêm muita deformação, pelo que sofrem rutura logo após atingirem a tensão limite elástico. Por vezes, o modelo não representa fielmente esse comportamento estando, provavelmente, na origem do erro a implementação do critério de rutura do material.

Face aos resultados obtidos para os materiais dúcteis, conclui-se que o modelo analisado não se apresenta vantajoso no estudo destes materiais para espessuras elevadas. Assim sendo, a sua utilização é apenas pertinente para espessuras até, aproximadamente, 1 mm. A falta de precisão do modelo pode estar relacionada com as grandes dimensões de espessura analisadas para este tipo de materiais, com a forma dos projéteis, podendo ainda ter influência as diferenças entre a implementação utilizada neste trabalho e a selecionada pelos autores da literatura usada na validação.

Nos casos de espessuras 6 ou 12 mm, os resultados obtidos estão em completo desacordo com o esperado. No entanto, para folhas de alumínio de espessuras 0.5, 0.71 e 1 mm, a fiabilidade do modelo aumenta, não sendo ainda aconselhável a sua utilização para velocidades baixas, inferiores a 100 m/s.

O método utilizado neste trabalho para avaliar a área danificada não se prova eficaz no caso dos materiais dúcteis devido à maneira como estes se deformam quando sofrem impacto por parte de um projétil. Esta situação, aliada ao facto da não existência de resultados para comparação na literatura, levou a que, para este tipo de materiais, não se apresentassem gráficos de valores de áreas danificadas.

Os resultados obtidos para os testes numéricos envolvendo materiais cerâmicos apresentam boa concordância com a literatura, mostrando-se problemático apenas o caso cuja configuração consiste num alvo de duas camadas, sendo uma delas cerâmica e a outra metálica. O maior erro obtido pode estar relacionado com o valor de espessura da placa metálica, tal como se verificou nos testes efetuados para materiais dúcteis. Nos restantes testes com estes materiais, foi abrangida uma grande gama de velocidades tendo sido obtidos resultados satisfatórios em toda ela.

Para o caso dos materiais cerâmicos, os valores de área danificada obtidos segundo o modelo simplificado são apresentados ao longo deste texto. No entanto, não existia qualquer termo de comparação na literatura, não sendo possível averiguar a validade dos resultados obtidos. No entanto, esperava-se que à medida que a velocidade de impacto aumentasse, o dano sofrido pela camada cerâmica fosse cada vez mais extenso, o que está de acordo com a maioria dos resultados obtidos.

Por fim, para existir uma melhor concordância entre os resultados obtidos através do modelo em estudo com os existentes na literatura, deveriam ser aplicadas ligeiras alterações ao modelo consoante o tipo de abordagem utilizada na literatura, uma vez que é frequente a implementação de critérios modificados. O tipo de elementos normalmente utilizado na literatura difere do utilizado no modelo, sendo os elementos sólidos frequentemente utilizados na discretização do material, o que pode também estar na origem das diferenças obtidas.

Capítulo 6

Simulações numéricas do impacto em alvos em IM7-8552

No presente capítulo vai ser estudada a resistência balística do material compósito IM7-8552. A primeira fase do estudo vai passar pela análise do material compósito isoladamente. De seguida, propõe-se a hibridização deste material, primeiramente, acrescentando, na parte posterior do painel, uma placa fina de alumínio. Outra configuração a ser estudada consiste no acrescento de uma placa cerâmica, em carboneto de silício, na parte frontal do painel, sendo esta atingida antes do material compósito. Por fim, testar-se-á uma configuração que combina as duas últimas, sendo empilhados tal como referido anteriormente, primeiro a camada cerâmica, de seguida o material compósito e, por fim, o material dúctil.

Espera-se que a resistência dos alvos híbridos seja superior à situação em que o IM7-8552 é estudado isoladamente. Relativamente a estes alvos, não se espera que exista uma relação de semelhança entre as configurações que envolvem apenas o compósito e um outro tipo de material. Espera-se que estas duas configurações ofereçam uma resistência balística inferior à oferecida pela configuração constituída pelos três diferentes tipos de materiais.

6.1 Material de base

O material de base selecionado é um compósito laminado, o Hexcel IM7-8552. Como já foi anteriormente mencionado, este material é tipicamente utilizado em estruturas aeroespaciais, daí o interesse da sua inclusão neste trabalho.

O laminado em estudo possui 13 camadas, cada uma delas com uma espessura igual a 0.125 mm. A sequência de empilhamento é $[45, -45, 0, 45, -45, 90, 0]_{\$}$ e as propriedades utilizadas na modelação encontram-se representadas na tabela 6.1. A fração de volume das fibras é 59.1% [23].

Tabela 6.1: Propriedades mecânicas do compósito IM7-8552 [23, 14]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	1.59E-9
E_1 [MPa]	171 42 0
E_2 [MPa]	9080
ν_{12}	0.32
G [MPa]	5290
X_t [MPa]	2626.2
X_c [MPa]	1200.1
Y_t [MPa]	62.3
Y_c [MPa]	198.8
S [MPa]	92.3

Tabela 6.2: Massa total do alvo em IM7-8552 sujeito ao impacto por parte dos três projéteis distintos

Projétil	m [g]
7.62 mm	16.5
12.7 mm	25.8
20 mm	37.2

O material, de espessura total 1.625 mm sofreu impacto por parte de três ameaças distintas, todas eles em aço, de diâmetro 7.62, 12.7 e 20 mm, numa gama de velocidades entre os 100 e os 900 m/s.

Tabela 6.3: Propriedades projétil em aço [54]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	7.8E-9
E [MPa]	210 000
ν	0.3

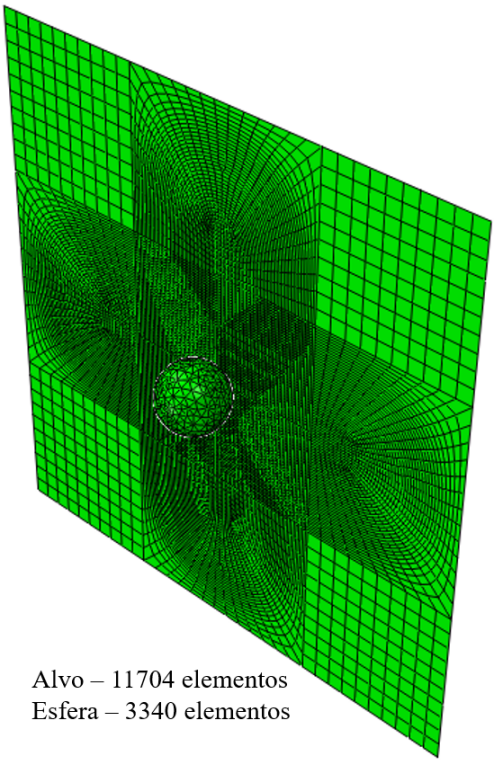


Figura 6.1: Instante inicial do impacto de um projétil de diâmetro 12.7 mm num alvo em IM7-8552

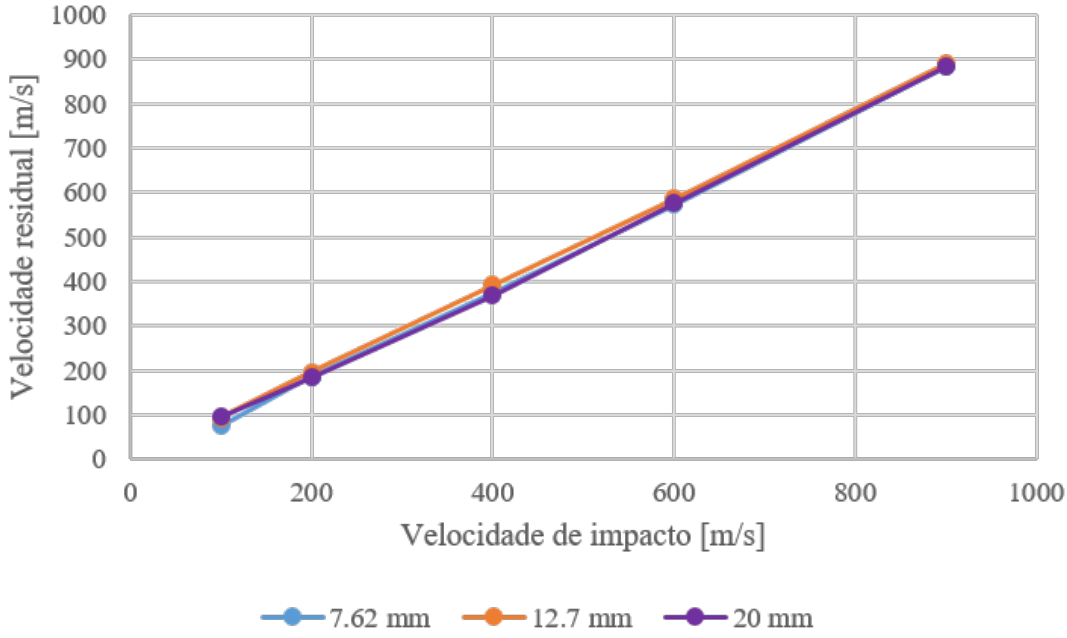


Figura 6.2: Velocidade residual dos projéteis em função da velocidade de impacto após colidir com um alvo em IM7-8552

Observando a figura 6.2, é imediatamente percetível que o alvo nunca consegue resistir à penetração de qualquer um dos projéteis, sendo as velocidades residuais bastante semelhantes em todos os três casos.

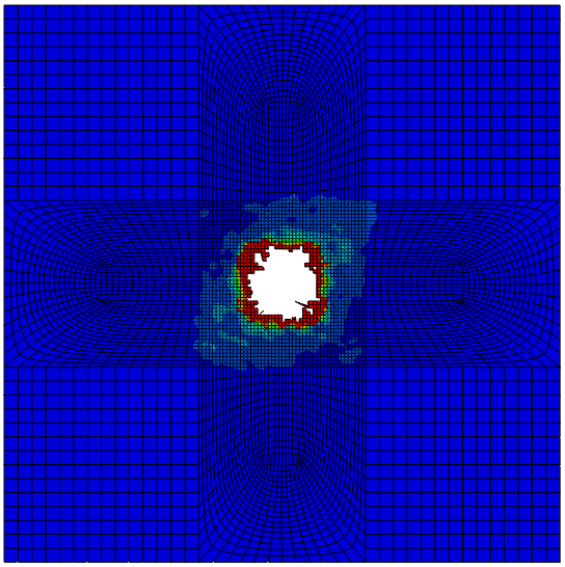


Figura 6.3: Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm a uma velocidade de 600 m/s (camada 4)

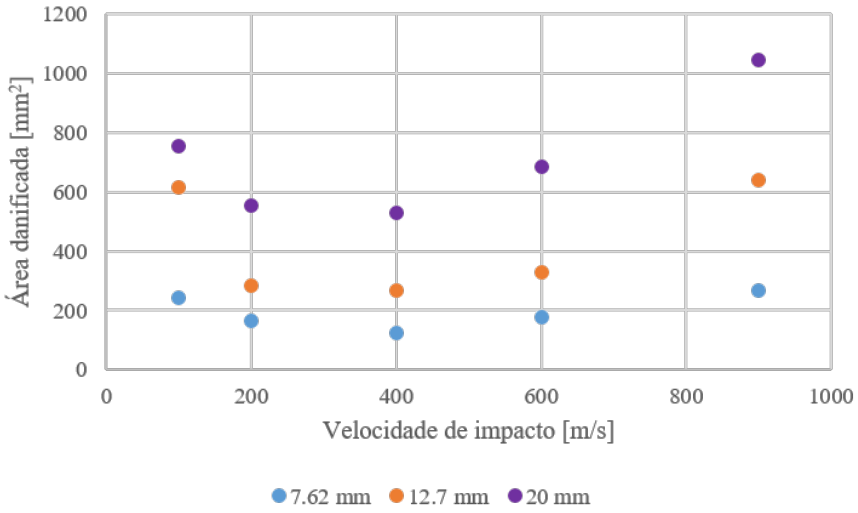


Figura 6.4: Área danificada num alvo em IM7-8552 em função da velocidade de impacto dos projéteis em aço

Na figura 6.4 estão representados os resultados obtidos para a área danificada, em mm^2, para uma gama de velocidades entre 100 e 600 m/s para as três ameaças distintas.

Uma vez que o alvo nunca resiste à penetração dos projéteis, a área danificada deveria ser semelhante para todas as velocidades testadas, sendo ligeiramente maior para as velocidades inferiores. Nas três situações, até à velocidade de 400 m/s, a área danificada sofre uma diminuição, até que aumenta para uma velocidade de 600 m/s, ultrapassando o primeiro valor obtido para a maior velocidade testada.

O modelo em estudo, para o caso dos materiais compósitos, foi validado para situações em que o ângulo de impacto é diferente de 0°. Deste modo, estudou-se a resposta do IM7-8552 face a um projétil a colidir com o alvo num ângulo de 30°, na mesma gama de velocidades.

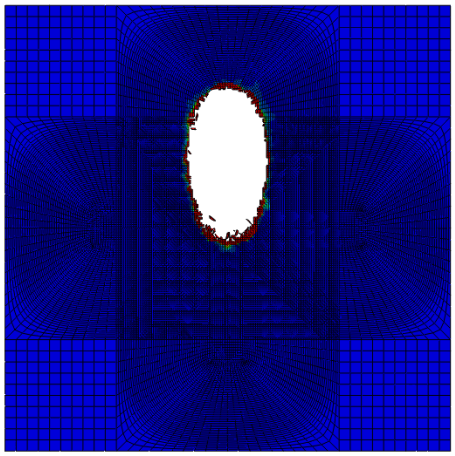


Figura 6.5: Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão a 600 m/s por parte de um projétil de 20 mm num ângulo de 30° (camada 7)

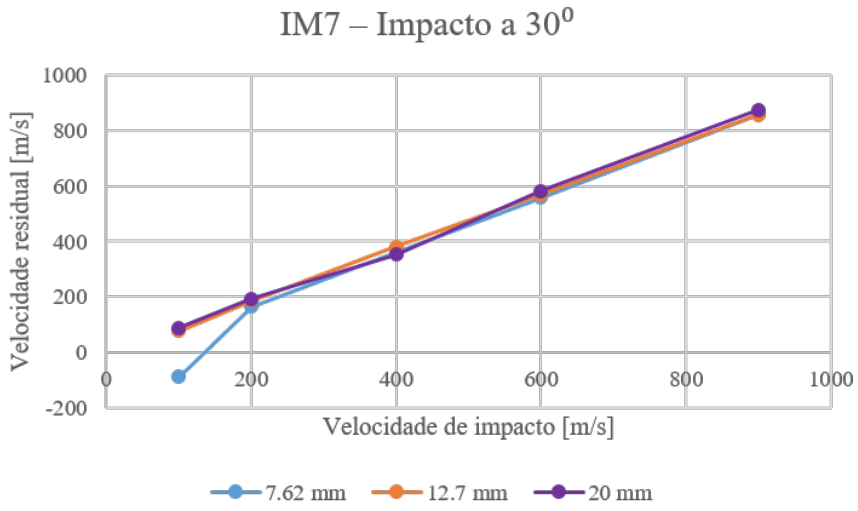


Figura 6.6: Velocidade residual de diferentes projéteis em aço em função da sua velocidade de impacto após colidir com um alvo em IM7-8552 num ângulo de 30°

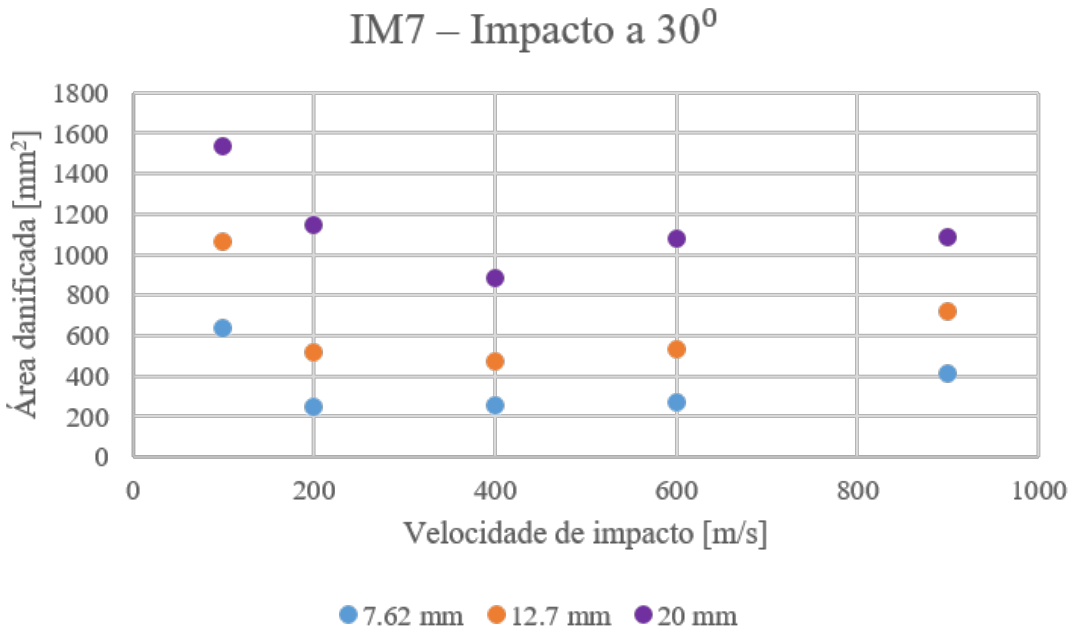


Figura 6.7: Área danificada de um alvo em IM7-8552 em função da velocidade de impacto de projéteis que colidem com o mesmo num ângulo de 30°

Analisando a figura 6.6, é notável que a única diferença significativa provocada pelo ângulo de impacto ocorre para o projétil de menor dimensão, apresentando este par uma velocidade limite balístico mais elevada. Relativamente à área danificada, é percetível, na figura 6.7, que, para as diversas ameaças testadas, o dano é mais extenso para o caso de impacto a 30° quando comparado com o caso anterior, tal como era expectável. Esta situação ocorre, pois, a nova trajetória do projétil, faz com que este esteja em contacto com o alvo durante um maior período de tempo, o que leva a uma maior extensão do dano.

6.2 Hibridização

A configuração estudada para o IM7-8552 não apresenta resistência balística suficiente para o tipo de aplicações em estudo, assim sendo são apresentadas nesta secção outras formas alternativas de maneira a tentar alcançar o nível de resistência balística exigida.

Tabela 6.4: Propriedades do alvo em alumínio 1100-H12 [40]

Propriedade	Valor
ρ [ton/mm^3]	2.7E-9
E [MPa]	65762
ν	0.3
A [MPa]	148.361
B [MPa]	345.513
C	0.001
n	0.183
m	0.859
$\dot{\varepsilon}_0$ [s^{-1}]	1
T$_{melt}$ [K]	893
T$_0$ [K]	293
D$_1$	0.071
D$_2$	1.248
D$_3$	-1.142
D$_4$	0.147
D$_5$	0

Numa tentativa de melhorar o desempenho balístico deste compósito serão estudados, para a mesma gama de velocidades, mais três configurações distintas de alvos. A primeira passa por acrescentar alumínio na parte posterior do compósito. A segunda consiste em colocar uma camada de material cerâmico na parte frontal do compósito, sendo então este o primeiro com que o projétil irá entrar em contacto. Por fim, a última configuração a ser testada é uma combinação das duas anteriores, isto é, acrescenta-se uma camada de material cerâmico antes do compósito e uma de material dúctil depois do mesmo.

Optou-se pela utilização de alumínio face ao aço, uma vez que o comportamento dos dois é semelhante entre si, não sendo a diferença de custo entre os dois significativa. Para além disso, a densidade do alumínio é, aproximadamente, igual a um terço da do aço. Este fator contribui para um menor peso do conjunto, o que é desejável em aplicações balísticas.

Selecionou-se o carboneto de silício, pois este é o material utilizado no exemplo de aplicação do critério Johnson-Holmquist no manual do Abaqus®. Dada esta situação, não é necessária fazer qualquer aproximação dos parâmetros intervenientes no critério através das equações apresentadas na secção 5.3.3, o que conduz a resultados mais fiáveis [73].

Tabela 6.5: Propriedades do carboneto de silício (JH-2) [73]

Propriedade	Valor
ρ_0 [ton/mm^3]	3.215E-9
G [MPa]	193 000
A	0.96
B	0.35
C	0.009
M	1
N	0.65
$\dot{\varepsilon_0}$ [s^{-1}]	1
ε^f_{min}	0
ε^f_{max}	1.2
T [MPa]	750
σ^i_{max} [MPa]	12 200
σ^f_{max} [MPa]	1300
HEL [MPa]	11 700
P_{HEL} [MPa]	5130
β	1
K_1 [MPa]	220 000
K_2 [MPa]	361 000
K_3 [MPa]	0
D_1 [MPa]	0.48
D_2 [MPa]	0.48

6.2.1 Compósito com material dúctil

O estudo do impacto em alvos dúcteis é ainda hoje um grande objeto de discussão, uma vez que, variando apenas algumas características, os resultados obtidos são, por vezes, contrários. Contudo, é certo que a deformação sofrida por alvos metálicos quando sujeitos a impacto causa mudanças significativas no comportamento do projétil. Daí a pertinência de estudar esta configuração de painel balístico em que o material dúctil constitui a parte posterior do alvo.

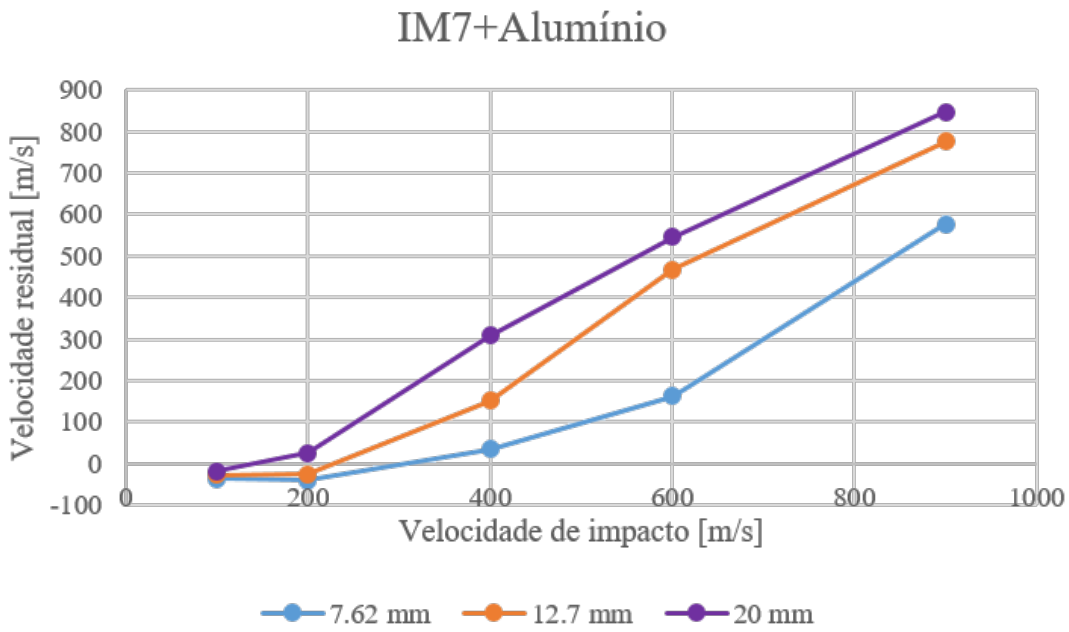


Figura 6.8: Velocidade residual em função da velocidade de impacto dos diferentes projéteis em aço após colisão com um alvo em IM7-8552/alumínio

Tabela 6.6: Massas das diferentes configurações IM7-8552 com material dúctil estudadas

Projétil	m [g]		
	IM7-8552	Al	Total
7.62 mm	16.5	10.4	26.9
12.7 mm	25.8	16.2	42
20 mm	37.2	23.3	60.5

Observando a figura 6.8, rapidamente se conclui que o alvo resiste a todas as ameaças para uma velocidade igual a 100 m/s. Aumentando a velocidade de impacto em 100 m/s, o projétil de maior dimensão é o único que consegue penetrar o alvo na totalidade, saindo com uma velocidade residual de, aproximadamente, 25 m/s. As duas restantes ameaças apenas conseguem perfurar o alvo para velocidades superiores a 400 m/s, o que mostra que esta configuração oferece uma resistência muito superior ao espécimen isolado de IM7-8552 estudado.

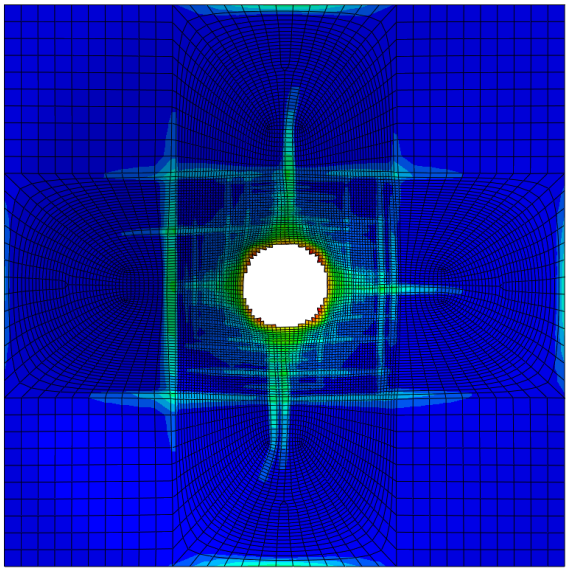


Figura 6.9: Área danificada, na camada de alumínio, após sofrer colisão de um projétil, de diâmetro 12.7 mm, a 400 m/s

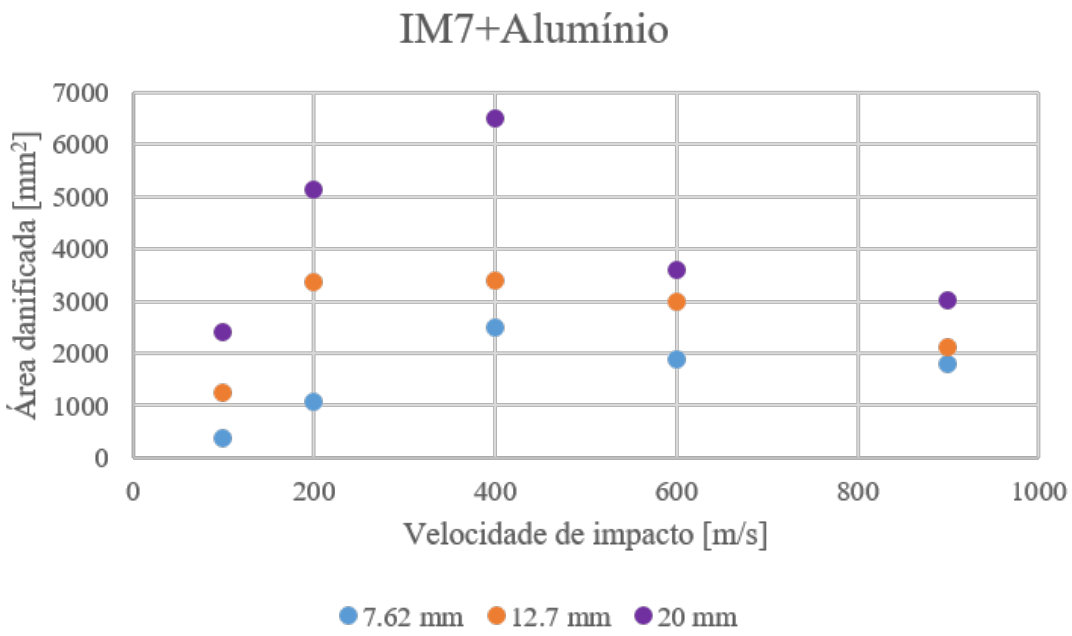


Figura 6.10: Área danificada em função da velocidade de impacto dos diferentes projéteis em aço após colisão com um alvo em IM7-8552/alumínio

Os maiores valores de área danificada são obtidos para o projétil de maior dimensão, sendo os do projétil de diâmetro 12.7 mm, valores intermédios e os menores valores obtidos correspondem à menor ameaça em estudo. A resistência balística desta configuração é superior à anteriormente

estudada, contudo, a área danificada neste último caso é muito superior à da situação em que o alvo era apenas constituído por IM7-8552. Esta situação deve-se à diferença de resistência à penetração oferecida por cada um dos diferentes painéis.

De acrescentar ainda que, para os projéteis de diâmetro 7.62 e 12.7 mm, os maiores valores de área danificada correspondem a uma velocidade próxima da velocidade limite balístico, o que é consistente com o comportamento dos compósitos face ao impacto.

Exemplos do dano sofrido nas camadas de material compósito para o projétil de 12.7 mm de diâmetro são fornecidos no anexo A, assim como, exemplos referentes ao dano sofrido face às duas ameaças restantes.

6.2.2 Cerâmico com material compósito

O acrescento de materiais cerâmicos na parte frontal do IM7-8552, ou seja, a primeira face a sofrer impacto, permite a obtenção de uma melhor resistência face a ameaças balísticas de maior calibre. A erosão provocada no projétil pelos materiais cerâmicos permite que ocorra uma diminuição elevada da capacidade de penetração do projétil, assim como da sua velocidade. Assim sendo, a função do parte posterior do alvo, em material compósito, é absorver a restante energia cinética do projétil, assim como reter alguns dos fragmentos que possam ter resultado da erosão do mesmo ao colidir com o cerâmico.

Tabela 6.7: Massa total das diferentes configurações de alvos em material cerâmico com IM7-8552 estudadas

Projétil	m [g]		
	IM7-8552	SiC	Total
7.62 mm	16.5	206	222
		309	325
12.7 mm	25.8	322	347
		482	508
20 mm	37.2	463	500
		624	732

Foram testadas duas espessuras distintas, 10 e 15 mm para o acrescento cerâmico. O caso de maior espessura é apresentado de seguida, estando os resultados obtidos para o caso de espessura 10 mm compilados no anexo A.

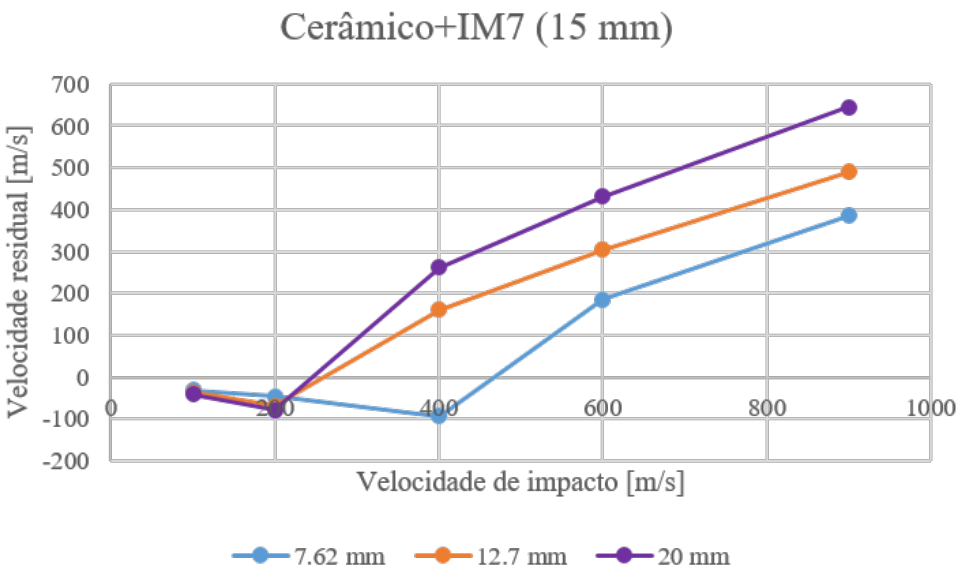


Figura 6.11: Velocidade residual de projéteis em aço, de diferentes diâmetros, em função da velocidade de impacto num alvo em carboneto de silício/IM7-8552 (espessura do cerâmico 15mm)

Comparando as figuras 6.2 e 6.11, são notáveis diferenças entre as duas, sendo que a última evidencia, para todas as três ameaças, velocidades residuais inferiores às obtidas para alvos unicamente compostos por material compósito. A diferença mais significativa ocorre para o caso do projétil de menor dimensão, verificando este uma velocidade limite balístico muito superior à situação anterior. No que diz respeito aos projéteis de dimensão 12.7 e 20 mm, o valor da velocidade limite balístico também aumenta, sendo, para ambos os casos, ligeiramente superior a 200 m/s.

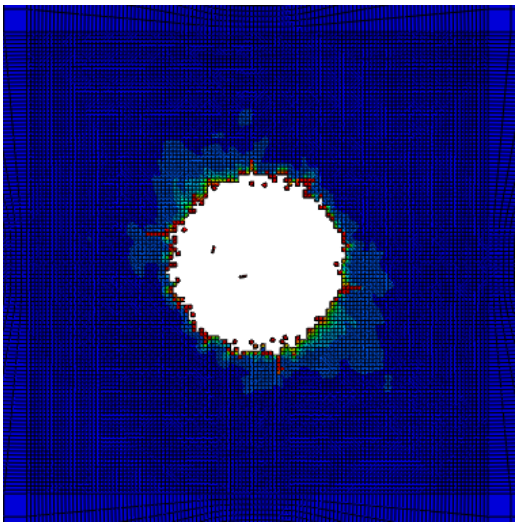


Figura 6.12: Área danificada na décima camada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 após sofrer colisão a 900 m/s de um projétil em aço

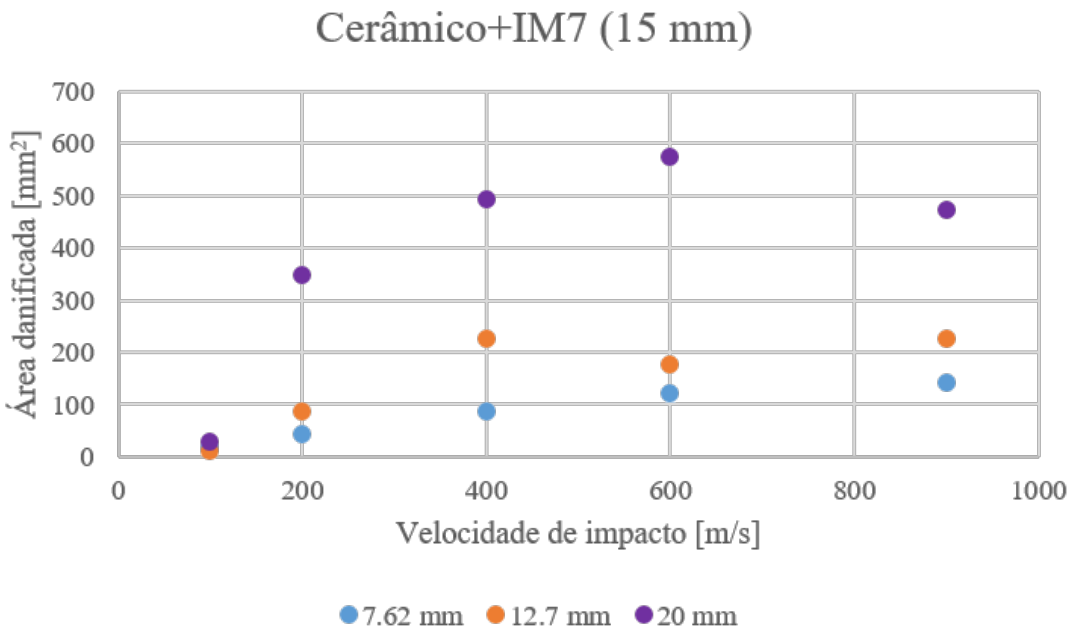


Figura 6.13: Área danificada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 em função da velocidade de impacto de projéteis em aço com diferentes dimensões

Na figura 6.13 encontram-se representados os valores de área danificada obtidos para situação em que na parte frontal do painel balístico se aplicou uma placa cerâmica com espessura 15 mm. De um modo geral, os resultados de área danificada são inferiores aos obtidos para a situação em que o painel era constituído apenas por IM7-8552, representada na figura 6.4. O material cerâmico não sofre danos extensos, a sua utilização deve-se a provocar o dano no projétil, daí os valores de área danificada obtidos terem sido inferiores no caso do alvo híbrido.

Encontram-se apresentados, no anexo A, mais exemplos referentes ao dano sofrido pelo alvo após colisão por parte das diferentes ameaças testadas.

6.2.3 Cerâmico com compósito e material dúctil

A diversidade de ameaças balísticas que existem atualmente é vasta, assim sendo, optou-se também por estudar a capacidade de proteção balística fornecida pela combinação das duas configurações anteriores. O alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio foi testado face a três ameaças distintas numa gama de velocidades de 100 a 900 m/s.

Esta configuração trata-se de uma combinação das duas anteriores analisadas, assim sendo, o alvo vai ser constituído por uma placa cerâmica na parte frontal, de seguida, será colocado o material compósito e, na parte posterior, o material dúctil.

Tabela 6.8: Massas das diferentes configurações estudadas que envolvem os três tipos de materiais

Projétil	m [g]			
	IM7-8552	Al	SiC	Total
7.62 mm	16.5	10.4	206	325
			309	336
12.7 mm	25.8	16.2	322	364
			482	524
20 mm	37.2	23.3	463	523
			694	755

Na tabela 6.8 encontram-se representadas as massas totais das diferentes hipóteses disponíveis para o estudo desta configuração. É esperada a obtenção de uma maior resistência balística num painel com espessura de cerâmico igual a 15 mm. Assim sendo, optou-se por se efetuarem os testes para essa situação, dado que a maior diferença de massas a ocorrer é de 232 g, para o caso do painel sujeito a uma ameaça de diâmetro 20 mm, o que não se revela como sendo uma diferença significativa.

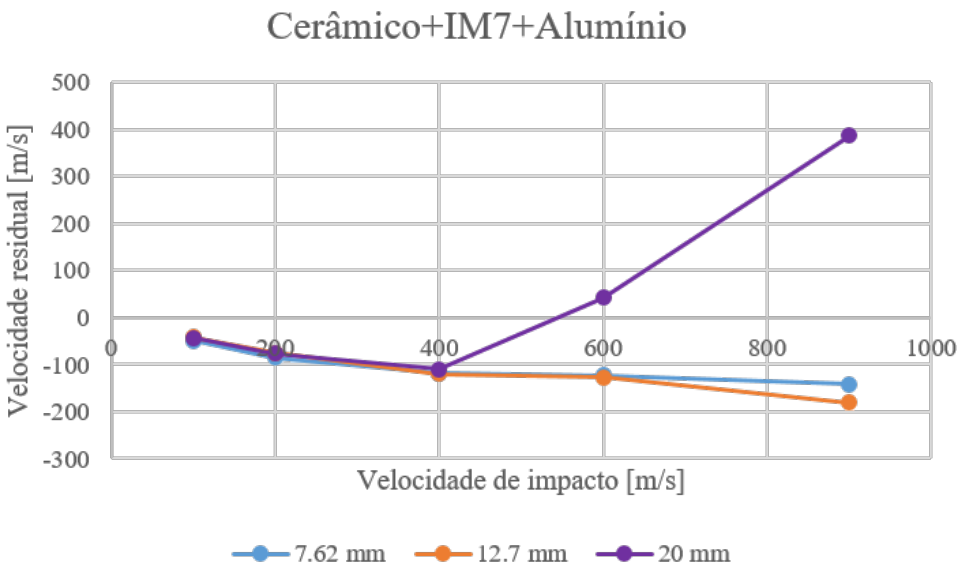


Figura 6.14: Velocidade residual em função da velocidade de impacto dos diferentes projéteis após colidirem com um alvo em SiC+IM7-8552+Al

Para os três primeiros valores de velocidade de impacto testados, 100, 200 e 400 m/s, nenhum dos projéteis é capaz de penetrar o alvo, sofrendo ricochete por parte do mesmo. Esta situação mantém-se para as restantes duas velocidades testadas, no que diz respeito às ameaças de diâmetro 7.62 e 12.7 mm. O projétil de diâmetro 20 mm consegue perfurar o painel com uma velocidade

de 600 m/s, demonstrando, assim, uma velocidade limite balístico inferior à das restantes duas ameaças.

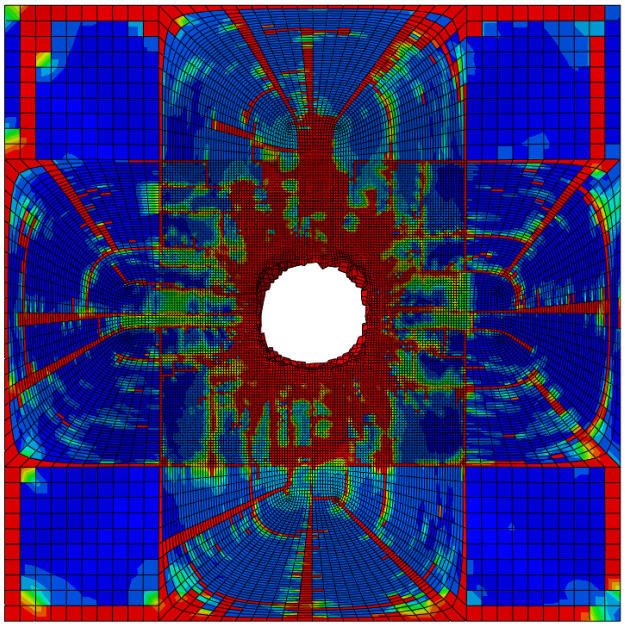


Figura 6.15: Área danificada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio após sofrer colisão a 900 m/s por parte de um projétil de diâmetro 20 mm (camada 11)

A figura 6.15, onde se encontra representada a área danificada de um alvo composto pelos três materiais, é um exemplo de uma situação que não está de acordo com o esperado. Ao invés da existência de um dano localizado, verifica-se a ocorrência do mesmo em zonas próximas das extremidades do painel, algo que não era esperado. Por detrás do erro evidenciado podem estar várias razões como, por exemplo, as condições de fronteira aplicadas, o modo como foram definidos os materiais ou, até mesmo, a malha utilizada.

Uma vez que o projétil de dimensão 7.62 mm sofre sempre ricochete por parte do alvo, a camada que suporta a quase totalidade dos danos é a primeira, ou seja, a camada cerâmica. Por isso, na figura 6.16, os resultados apresentados correspondem ao dano que ocorre na primeira camada de compósito, IM7-8552, uma vez que os resultados numéricos obtidos para a camada cerâmica mostram que esta se encontra totalmente danificada.

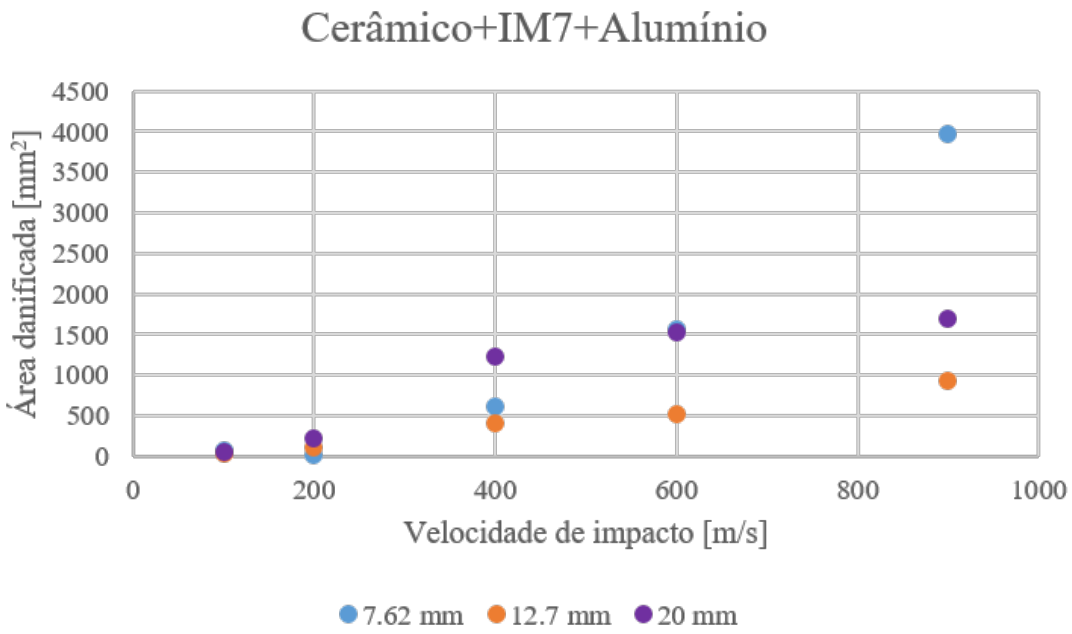


Figura 6.16: Área danificada em função da velocidade de impacto dos diferentes projéteis após colidirem com um alvo em carboneto de silício,IM7-8552 e alumínio

Com o aumento da velocidade de impacto dos projéteis, regista-se também um aumento da área danificada. Contudo, ao contrário do ocorrido nas situações anteriores, o maior valor de área danificada apresenta-se para o caso de maior velocidade de impacto do projétil de dimensão 7.62 mm. Este valor é superior ao dobro do maior valor registado para as restantes ameaças. Esta situação leva a crer que a velocidade limite balístico do par projétil-alvo em análise terá um valor próximo de 900 m/s, valor de velocidade de impacto a partir do qual seria esperado que a área danificada sofresse uma diminuição.

6.3 Discussão dos resultados obtidos

Numa primeira fase, analisou-se um painel balístico em IM7-8552. Independentemente da velocidade testada era esperado que o alvo não resistisse a nenhuma das ameaças testadas, uma vez que a sua espessura total é igual a 1.625 mm. Mesmo considerando a elevada rigidez e resistência das fibras, a possibilidade de resistir a projéteis com diâmetro, aproximadamente, cinco vezes maior (tendo em conta o diâmetro 7.62 mm) era remota. Para todos os casos a área danificada no alvo diminui até se chegar a uma velocidade de impacto de 600 m/s, valor este para o qual ela começa a aumentar. O aumento não é muito significativo, no entanto, não vai de acordo com o esperado. Esta tendência pode estar relacionada com a orientação das diversas camadas do laminado, originando, para velocidades maiores, um dano maior do que aquele que seria previsto. Quando analisado exatamente o mesmo alvo mas, desta vez, a sofrer impacto por parte de

um projétil num ângulo de 30°, os resultados esperados não eram muito diferentes dos obtidos para a situação anterior. A nível de resistir à perfuração do projétil esperava-se sensivelmente a mesma resposta que no caso anterior, contudo era esperado que ocorresse uma área danificada mais extensa, tal como foi verificado.

Acrescentando os novos materiais esperava-se uma melhoria clara na resistência balística do alvo. Ao adicionar a placa fina de alumínio, a perda em massa mostrou-se uma boa relação custo-benefício face às melhorias verificadas. Uma vez que o material dúctil se deforma plasticamente, acompanhando a trajetória do projétil, foi possível absorver uma maior quantidade da sua energia cinética, aumentando assim a capacidade do painel de imobilizar a ameaça. Relativamente à área danificada era de esperar que o valor máximo fosse atingido para a velocidade limite balístico, o que apenas se verifica para a menor ameaça em teste. Esta pequena incoerência pode estar diretamente relacionada com o acrescento da placa de alumínio, e com as alterações que esta adição provoca no comportamento total do alvo, ao invés de ser considerado apenas com um material.

O caso dos materiais cerâmicos, apesar de terem sido obtidos bons resultados, isto é, de acordo com o expectável, acaba por se tornar um pouco difícil de analisar. Isto porque o projétil foi implementado como sendo elástico, ou seja, não se danifica. O objetivo principal da colocação de uma placa cerâmica na parte frontal de um painel balístico é a erosão do projétil, que não se verifica, devido ao tipo de modelação implementado. No âmbito das velocidades, os resultados obtidos para esta situação e a anterior são semelhantes, estando a grande diferença presente na diferença das áreas danificadas obtidas e na massa total dos alvos. Para avaliar a melhor opção de entre estas duas seria necessário saber qual seria a sua aplicação. Em certas situações pode ser vantajoso um painel mais leve, apesar de se danificar numa maior extensão, que um painel de massa mais elevada capaz de suster mais impactos sucessivos antes de ficar completamente danificado.

Os resultados obtidos na última configuração testada apresentam-se como sendo melhores do que o esperado, uma vez que não se previa que o painel em estudo fosse capaz de resistir, em toda a gama de velocidades, às duas ameaças de menor dimensão. Relativamente à área danificada, existe apenas um valor que causa dúvidas, os 4000 mm^2 obtidos para o projétil de 7.62 mm de diâmetro a uma velocidade de 900 m/s. De acordo com este resultado prevê-se que que o limite balístico deste par projétil-alvo estaria próximo deste valor, sendo que, a partir desse valor, a área danificada diminuiria. No entanto, esse valor apresenta-se ainda como sendo bastante elevado face aos restantes, o que nos leva a concluir que pode existir algum erro na implementação que possa também estar relacionado com os evidenciados na análise da figura 6.15.

Capítulo 7

Discussão, conclusões e trabalhos futuros

Um modelo simples utilizando elementos de casca na discretização do alvo foi utilizado para analisar a resistência balística do material compósito IM7-8552. Este modelo foi previamente validado recorrendo a literatura, dado que não existiu a possibilidade de realização de testes experimentais. Sentiram-se algumas dificuldades na validação do modelo, uma vez que é frequente que os parâmetros fornecidos na literatura não estejam de acordo com o tipo de modelação utilizada. Esta situação deve-se, por vezes, a utilização de softwares distintos do selecionado para a realização deste trabalho, mas também devido à utilização de critérios de rutura alternativos.

Para espessuras até 20 mm e velocidades superiores a 200 m/s, o modelo apresenta uma boa correlação com os dados referentes na literatura existente sobre materiais compósitos. Ainda para este tipo de materiais, para o caso de espessuras mais elevadas, os resultados tornam-se satisfatórios com velocidades na ordem dos 1000 m/s. Na análise de materiais dúcteis, os resultados obtidos não estão em concordância com a literatura. Para armaduras em aço com espessuras a variar entre os 6 e os 12 mm, o projétil não é capaz de perfurar o alvo para nenhuma das velocidades, o que é contrário ao referenciado na literatura. Para o caso do alumínio, os resultados são ligeiramente melhores, deixando ainda a desejar quando comparados com os resultados obtidos para os materiais compósitos. Por último, na análise efetuada a materiais cerâmicos, os resultados obtidos apresentam, de um modo geral, uma boa correlação com os expressos na literatura, numa diversa gama de velocidades. De salientar que, apesar da simplicidade do modelo em estudo, foi possível obter resultados, com um projétil esférico, que apresentam uma boa aproximação a projéteis com melhores características penetrantes, como é o caso dos projéteis cónicos e ogivais.

Os resultados obtidos na análise da resistência balística com material compósito IM7-8552 estão de acordo com o esperado. Estudando o material compósito isoladamente, a sua resistência balística é praticamente nula, não se verificando melhorias significativas quando testado na situação de impacto do projétil a 30°. Tal como o esperado, a resistência balística dos painéis híbridos foi superior à das duas situações anteriormente referidas. Nos painéis constituídos por carboneto de silício e IM7-8552 e IM7-8552 e alumínio, as velocidades residuais dos projéteis obtidas são

semelhantes entre si. No entanto, a área danificada em cada um destes casos é bastante diferente, sendo muito superior na situação em que se colocou um prato de alumínio na parte posterior do material compósito. Conclui-se que a configuração constituída pelos três materiais distintos é a que possui maior resistência balística de todas as diferentes configurações testadas, tal como o previsto.

No futuro, aconselha-se a realização de testes experimentais para a validação do modelo e dos resultados obtidos através do mesmo, assim como o desenvolvimento do trabalho realizado. A implementação de dano no projétil deveria ser uma das primeiras preocupações, dado que a função da camada cerâmica é precisamente provocar a erosão do mesmo, diminuindo o seu poder de penetração. Deverá também ser tida em consideração a implementação do dano na camada cerâmica, uma vez que, através do critério de rutura implementado, é frequente que não seja possível analisar o dano nessa camada. Para além disto, deveriam ser abordadas mais formas de projéteis, com diferentes poderes de penetração, podendo deste modo obter resultados mais próximos da realidade. Seria importante considerar também as interações entre as diferentes camadas do painel, assumindo a existência de atrito não só entre o projétil e o alvo, mas também o atrito existente entre as diferentes camadas entre si. Por fim, este trabalho pode ser aplicado a outras áreas que não só a balística, estudando outros tipos de impacto em alvos de forma diferente, com projéteis diversos.

Referências

[1] Alir_mcs - advanced lightweight impact resistant: materials, components and structures. Technical report.

[2] *Moderna Enciclopédia Universal - Volume 2*. Círculo de Leitores, Rio de Mouro, 1984.

[3] *Moderna Enciclopédia Universal - Volume 14*. Círculo de Leitores, Rio de Mouro, 1987.

[4] *História Universal - Volume I*. Círculo de Leitores, Rio de Mouro, 1989.

[5] *Nova Enciclopédia Larousse - Volume 2*. Círculo de Leitores, Rio de Mouro, 1997.

[6] *Nova Enciclopédia Larousse - Volume 12*. Círculo de Leitores, Rio de Mouro, 1998.

[7] *Nova Enciclopédia Larousse - Volume 13*. Círculo de Leitores, Rio de Mouro, 1998.

[8] *Grande Enciclopédia Planeta - Volume 9*. Planeta, Espanha, 2007.

[9] Dupont USA. `http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar.html`, Março 2017.

[10] Dyneema® - DSM. `http://www.dsm.com/products/dyneema/en_GB/home.html`, Março 2017.

[11] Honeywell Spectra®. `https://www.honeywell-spectra.com/`, Março 2017.

[12] M. M. Ansari and A. Chakrabarti. Impact behavior of gfrp and kevlar/epoxy sandwich composite plate: Experimental and fe analyses. *Journal of Mechanical Science and Technology*, pages 771–776, October 2016.

[13] A. Arias, J. A. Rodríguez-Martínez, and A. Rusinek. Numerical simulations of impact behavior of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles. *Enginerring Fracture Mechanics*, pages 1635–1656, July 2007.

[14] Autodesk. Helius composite. `https://www.autodesk.com/products/helius-composite/overview`, Abril 2017.

[15] A. K. Bandaru, V. V. Chavan, S. Ahmad, and R. Alagirusamy. Ballistic impact response of kevlar® reinforced thermoplastic composite armors. *International Journal of Impact Engineering*, pages 1–13, November 2015.

[16] A. Banerjee, S. Dhar, S. Acharyya, D. Datta, and N. Nayak. Numerical simulation of ballistic impact of armour steel plate by typical armour piercing projectile. *Procedia Engineering*, pages 347–354, 2016.

[17] J. Barker, C. Black, and R. Cloud. Comfort comparison of ballistic vest panels for police officers. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, pages 1–12, Spring 2010.

[18] I. S. C. Benloulo and V. Sánchez-Gálvez. A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors. *International Journal of Impact Engineering*, pages 461–471, 1998.

[19] V. Bodepati, K. Mogulanna, G. S. Rao, and M. Vemuri. Numerical simulation and experimental validation of e-glass/epoxy composite material under ballistic impact of 9mm soft projectile. *Procedia Engineering*, pages 740–746, 2016.

[20] T. Børvik, S. Dey, and A. Clausen. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, pages 948–964, December 2008.

[21] T. Børvik, M. Langseth, O. S. Hoperstad, and K. A. Malo. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Part i: Experimental study. *International Journal of Impact Engineering*, pages 19–35, January 2002.

[22] L. C. T, V. P. W. Shim, and Y. H. Ng. Finite-modelling of the ballistic impact of fabric armor. *International Journal of Impact Engineering*, pages 13–31, April 2002.

[23] P. P. Camanho and M. Lambert. A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials. *Composites Science and Technology*, pages 3004–3020, April 2006.

[24] B. A. Cheeseman and T. A. Bogetti. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. *Composite Structures*, pages 161–173, 2003.

[25] R. Chi, A. Serjouei, I. Sridhar, and G. E. B. Tan. Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach. *International Journal of Impact Engineering*, pages 37–46, October 2012.

[26] T.-L. Chu, C. Ha-Minh, and A. Imad. Analysis of local and global localizations on the failure phenomenon of 3d interlock woven fabrics under ballistic impact. *Composite Structures*, pages 267–277, September 2016.

[27] N. Correia, N. Rocha, and S. Sadek. State of the art and technology report: Wp3 - medium and high energy impact protection materials. Technical report.

[28] J. M. C. da Fonseca Justo. Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos, 1996.

[29] J. A. da Silva Santos. Métodos de análise de impactos balísticos, 2015.

[30] M. F. S. F. de Moura and A. B. de Magalhães. *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Publindústria, 2005.

[31] B. Dean. *Helmets and Body Armor in Modern Warfare*. Yale University Press, 1920.

[32] G. Design. Ces edupack. `http://www.grantadesign.com/education/edupack/`, Julho 2016.

[33] S. Dey, T. Børvik, X. Teng, T. Wierzbicki, and O. S. Hopperstad. On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation. *International Journal of Solids and Structures*, pages 6701–6723, March 2007.

[34] C. B. et coll. *Matériaux Composites*. Dunod, 2005.

[35] Z. Fawaz, W. Zheng, and K. Behdinan. Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours. *Composites Structures*, pages 387–395, 2004.

[36] S. Feli and M. Asgari. Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact. *Composites: Part B*, pages 771–780, January 2011.

[37] J.-C. Fredouille. *Dicionário Temático Larousse - Civilização Romana*. Círculo de Leitores, 4212 edition, 1999.

[38] D. Gay and S. V. Hoa. *Composite Materials - Design and Applications*. CRC Press, second edition, 2007.

[39] W. Gooch, M. Burkins, and R. Squillacioti. Ballistic testing of commercial aluminum alloys and alternate processing techniques to increase the availability of aluminum armor. In *23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain*, 2007.

[40] N. K. Gupta and M. A. I. andG. S. Sekhon. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates. *International Journal of Solids and Structures*, pages 3411–3439, November 2006.

[41] C. Ha-Minh, A. Imad, T. Kanit, and F. Boussu. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric. *International Journal of Mechanical Sciences*, pages 32–39, January 2013.

[42] Z. Hashin and A. Rotem. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials. *Journal of Composite Materials*, pages 448–464, October 1973.

[43] L. D. Heaton. *Wound Ballistics*. Medical Department of United States Army, 1962.

[44] T. J. Holmquist and G. R. Johnson. Response of boron carbide subjected to high velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, pages 742–752, August 2007.

[45] G. R. Johnson and W. H. Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics*, April 1983.

[46] G. R. Johnson and W. H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, pages 31–48, 1985.

[47] G. R. Johnson and T. J. Holmquist. An improved computational constitutive model for brittle materials. *American Institute of Physics*, pages 981–984, 1994.

[48] G. R. Johnson and T. J. Holmquist. Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates and high pressures. *Journal of Applied Physics*, pages 8060–8073, June 1999.

[49] J. M. C. F. Justo. *Estudo do Comportamento ao Impacto de Alta Velocidade de Estruturas em Materiais Compósitos*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2005.

[50] W. F. A. Júnior, M. A. Santos, F. L. Bastian, J. C. M. Suarez, C. A. L. V, and G. Q. Chaves. Comportamento sob impacto balístico de um sistema compósito para blindagem. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, pages 12–18, June 2006.

[51] K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, and S. D. Rajan. Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact. *Composites: Part B*, pages 583–593, October 2010.

[52] G. R. Liu and S. S. Quek. *The Finite Element Method. A Pratical Course*. Butterworth Heinemann, first edition, 2003.

[53] W. Liu, Z. Chen, X. Cheng, Y. Wang, A. R. Amankwa, and J. Xu. Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor. *Composites Part B*, pages 33–40, September 2015.

[54] J. López-Puente, R. Zaera, and C. Navarro. Experimental and numerical analysis of normal and oblique ballistic impacts on thin carbon/epoxy woven laminates. *Composites: Part A*, pages 374–387, October 2007.

[55] J. C. C. Mestre. Análise numérico-experimental de blindagens balísticas, 2015.

[56] M. R. Millán, C. E. Moreno, M. Marco, C. Santiuste, and H. Miguélez. Numerical analysis of the ballistic behavior of kevlar®composite under impact of double-nosed stepped cylindrical projectiles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, pages 124–137, 2015.

[57] S. Min, X. Chen, Y. Chai, and T. Lowe. Effect of reinforcement continuity on the ballistic performance of composites reinforced with multiply plain weave fabric. *Composites Part B*, pages 30–36, December 2015.

[58] A. H. Mirrahimi, M. Hasanzadeh, V. Mottaghitalab, and P. Sharma. Numerical modelling of ballistic impact on hmpv woven fabric impregnated with shear-thickening fluids. *Procedia Engineering*, pages 73–76, 2016.

[59] S. S. Morye, P. J. Hine, R. A. Duckett, S. J. Carr, and I. M. Ward. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Composites Science and Technology*, pages 2631–2642, May 2000.

[60] N. Naik, S. Kumar, D. Ratnaveer, M. Joshi, and K. Akella. An energy-based model for ballistic impact analysis of ceramic-composite armors. *International Journal of Damage Mechanics*, pages 145–187, 2012.

[61] N. K. Naik and P. Shrirao. Composite structures under ballistic impact. *Composite Structures*, pages 579–590, July 2004.

[62] N. Nayak, A. Banerjee, and T. R. Panda. Numerical study on the ballistic impact response of aramid fabric-epoxy laminated composites by armor piercing projectile. *Procedia Engineering*, pages 230–237, 2016.

[63] L. H. Nguyen, T. R. Lässig, S. Ryan, W. Riedel, and A. P. Mouritz. A methodology for hydrocode analysis of ultra-high molecular weight polyethylene composite under ballistic impact. *Composites: Part A*, pages 224–235, January 2016.

[64] L. H. Nguyen, S. Ryan, S. J. Cimpoeru, A. P. Mouritz, and A. C. Orifici. The effect of target thickness on the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite. *International Journal of Impact Engineering*, pages 174–183, January 2015.

[65] E. Oñate. *Structural Analysis with the Finite Element Method. Volume 1: Basis and Solids*. Springer Science and CIMNE, first edition, 2009.

[66] M. Pasquali, C. Terra, and P. Gaudenzi. Analytical modelling of high-velocity impacts on thin woven fabric composite targets. *Composite Structures*, pages 951–965, July 2015.

[67] J. M. G. T. Pinto. Avaliação do comportamento mecânico de blindagens balísticas, 2009.

[68] F. A. Reifler, E. H. Lehmann, G. Frei, H. May, and R. Rossi. The method of neutron imaging as a tool for the study of the dynamics of water movement in wet aramid-based ballistic body armour panels. *Measurement Science and Technology*, pages 1925–1934, June 2006.

[69] G. P. Robert Cowley. *The Reader's Companion to Military History*. Houghton Mifflin Company, Eleventh edition, 2001.

[70] M. M. Shokrieh and G. H. Javadpour. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. *Composite Structures*, pages 269–276, January 2007.

[71] M. A. Silva, C. Cismaşiu, and C. Chiorean. Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates. *International Journal of Impact Engineering*, pages 289–306, January 2004.

[72] D. Systemes. Abaqus. `https://www.3ds.com/`, Junho 2017.

[73] D. Systemes. Abaqus 6.12 - example problems manual. `http://xn--90ajn.xn--p1ai/library/abaqus_doc/Documentation/docs/v6.12/books/exa/default.htm?startat=ch02s01aex77.html`, Julho 2017.

[74] D. W. Templeton, T. J. Gorsich, and T. J. Holmquist. Computational study of a functionally graded ceramic-metallic armor. Technical report.

[75] R. Zaera and V. Sánchez-Gálvez. Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours. *International Journal of Impact Engineering*, pages 133–148, 1998.

[76] X. Zhang, T. Liu, N. He, and G. Jia. Investigation of two finite element modelling approaches for ballistic impact response of composite laminates. *International Journal of Crashworthiness*, December 2016.

[77] T. I. Zohdi and D. Powell. Multiscale construction and large-scale simulation of structural fabric undergoing ballistic impact. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pages 94–109, January 2005.

[78] M. Übeyli, R. O. Yildirim, and B. Ögel. On the comparison of the ballistic performance os steel and laminated composite armors. *Materials and Design*, pages 1257–1262, February 2006.

REFERÊNCIAS

Anexo A

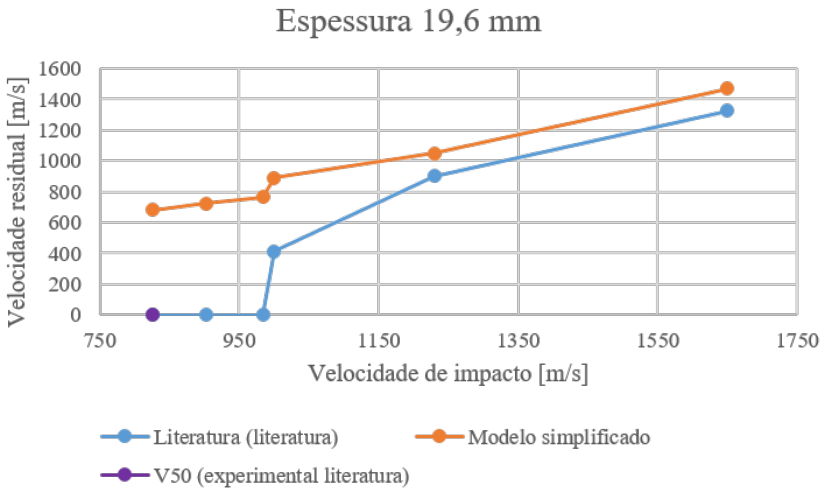


Figura 1: Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 19.6 mm [63]

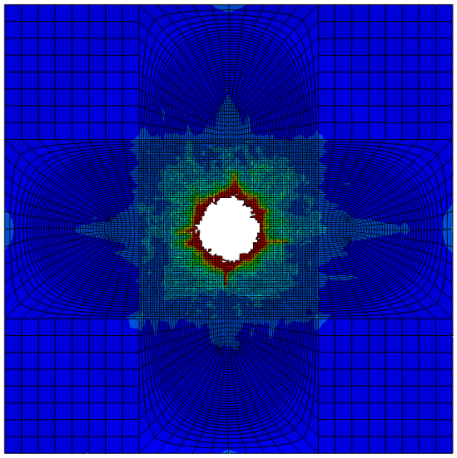


Figura 2: Área danificada de um alvo em UHMWPE (espessura 19.6 mm) após colisão com um projétil de diâmetro 12.7 mm a uma velocidade de 902 m/s (camada 14)

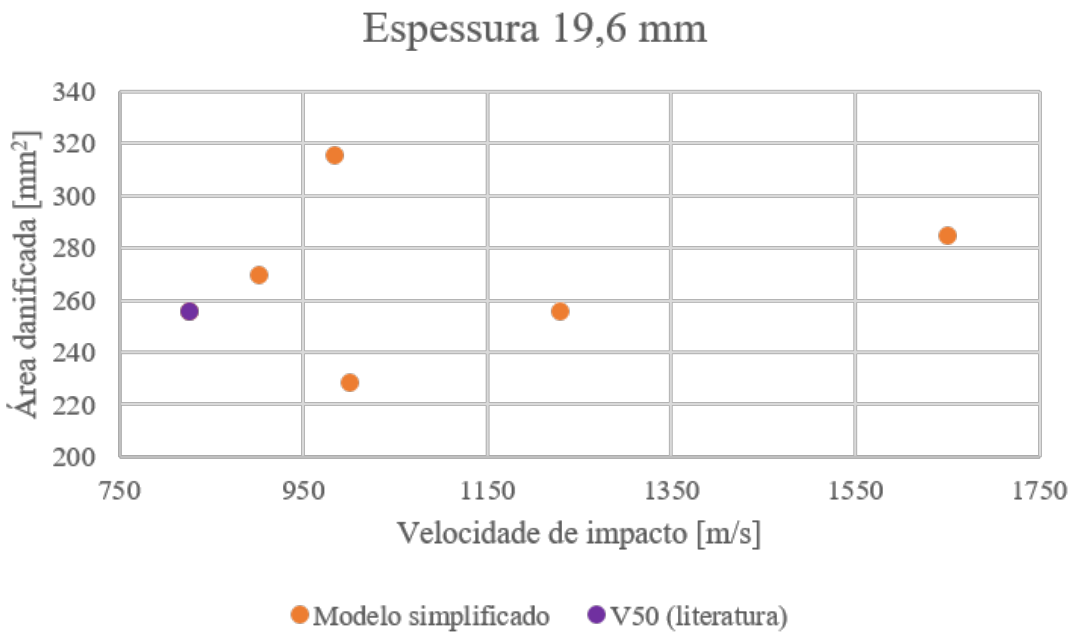


Figura 3: Área danificada num alvo em UHMWPE de espessura 19.6 mm em função da velocidade de impacto do projétil

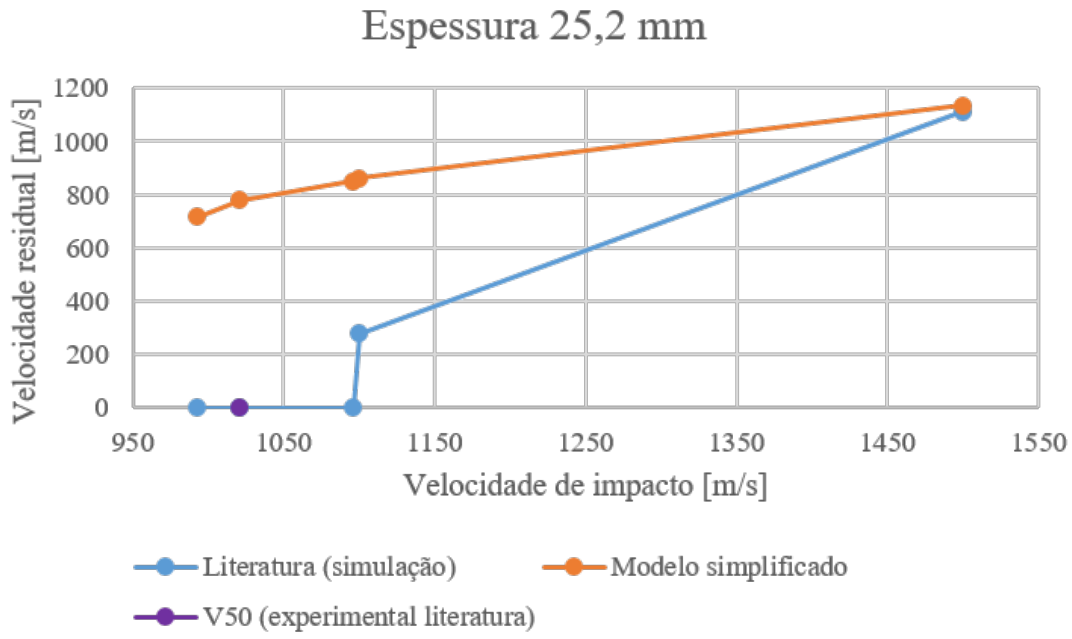


Figura 4: Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 25.2 mm [63]

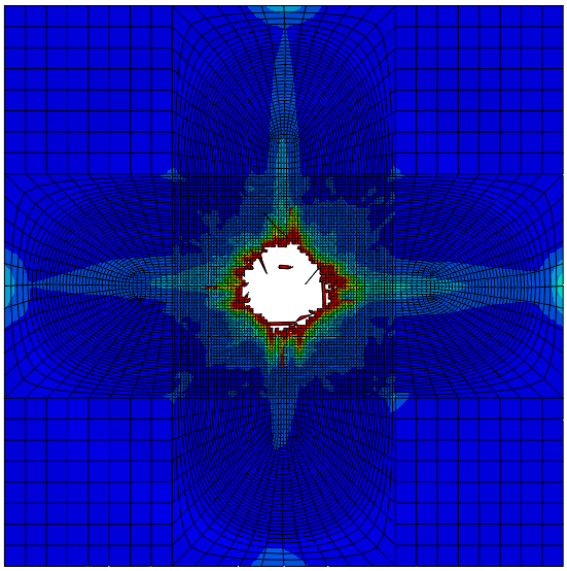


Figura 5: Área danificada da décima camada de um alvo de 25.2 mm de espessura em UHMWPE após colisão a 1500 m/s de um projétil de diâmetro 12.7 mm

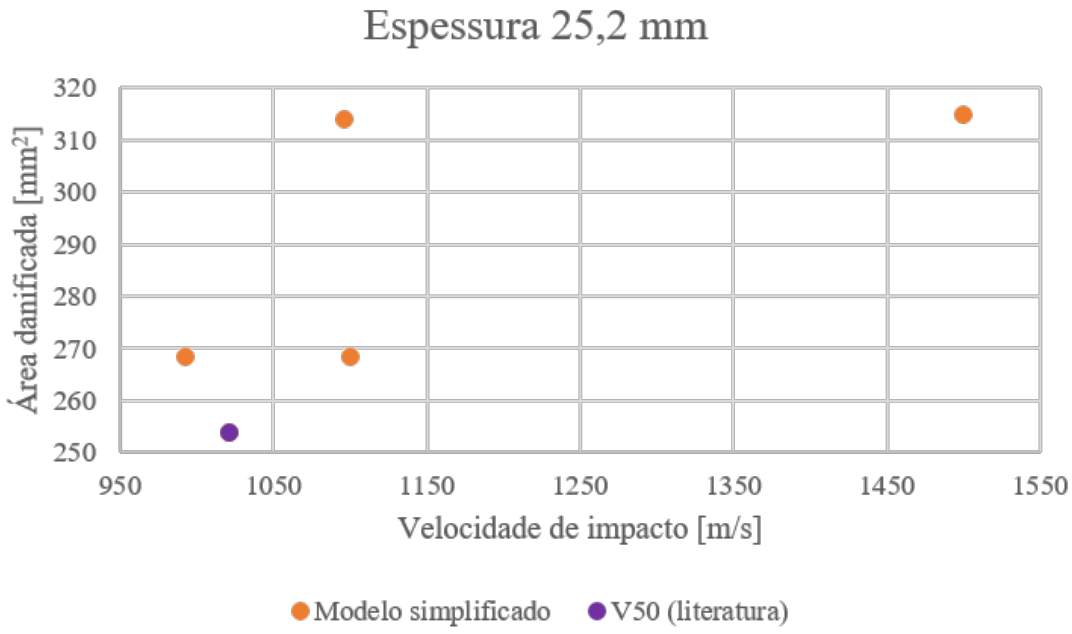


Figura 6: Área danificada de um alvo em UHMWPE (espessura 25.2 mm) em função da velocidade de impacto

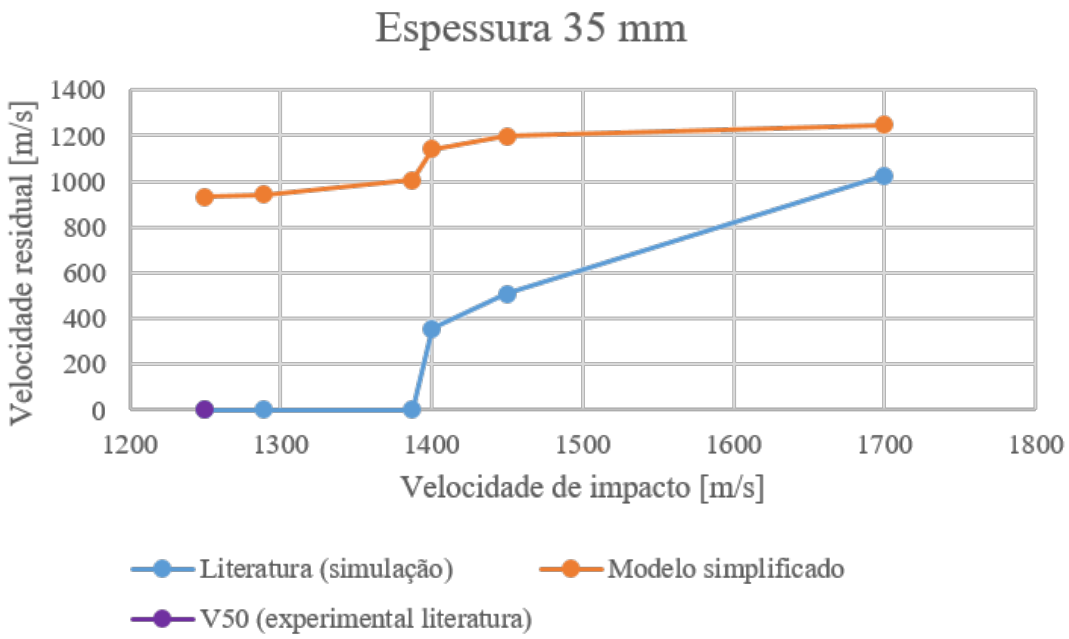


Figura 7: Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 35 mm [63]

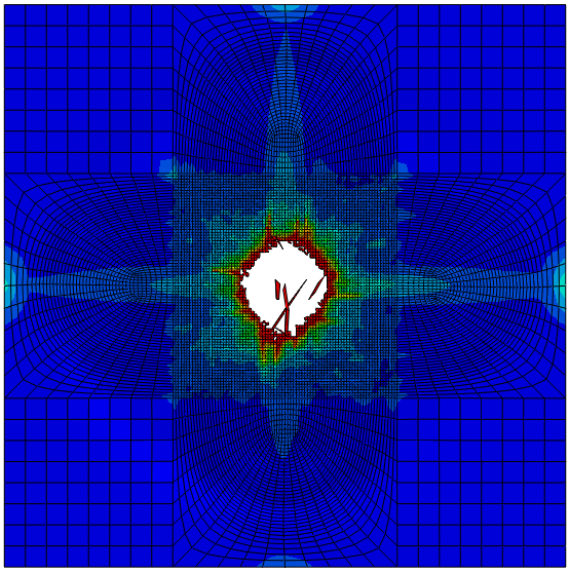


Figura 8: Área danificada na camada 21 de um alvo de espessura 35 mm em UHMWPE após sofrer impacto de um projétil de diâmetro 12.7 mm a 1250 m/s

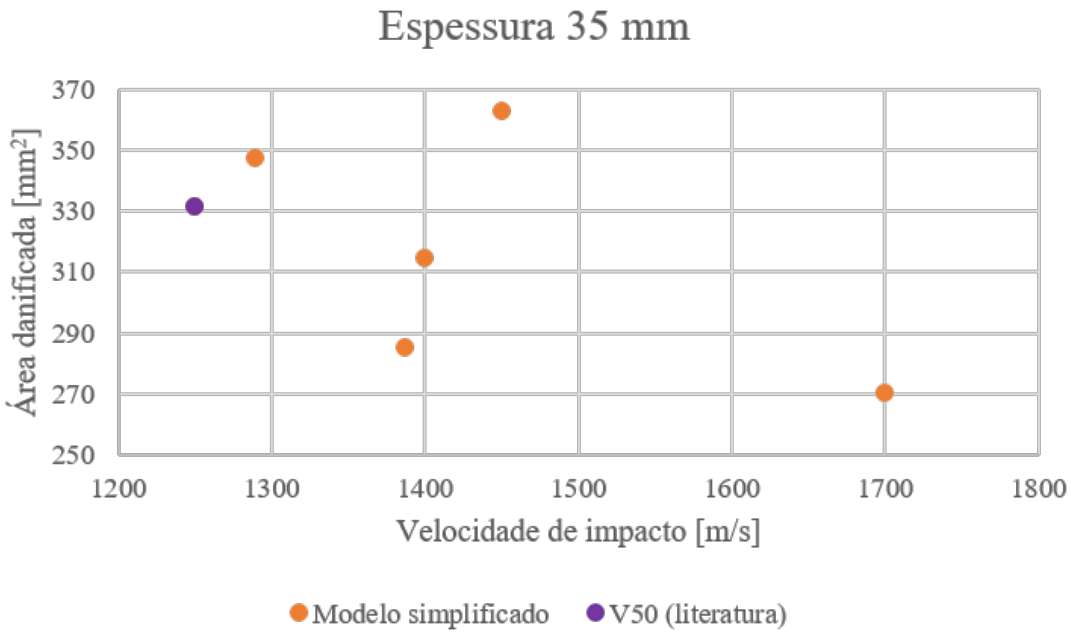


Figura 9: Área danificada em função da velocidade de impacto num alvo de 35 mm de espessura em UHMWPE

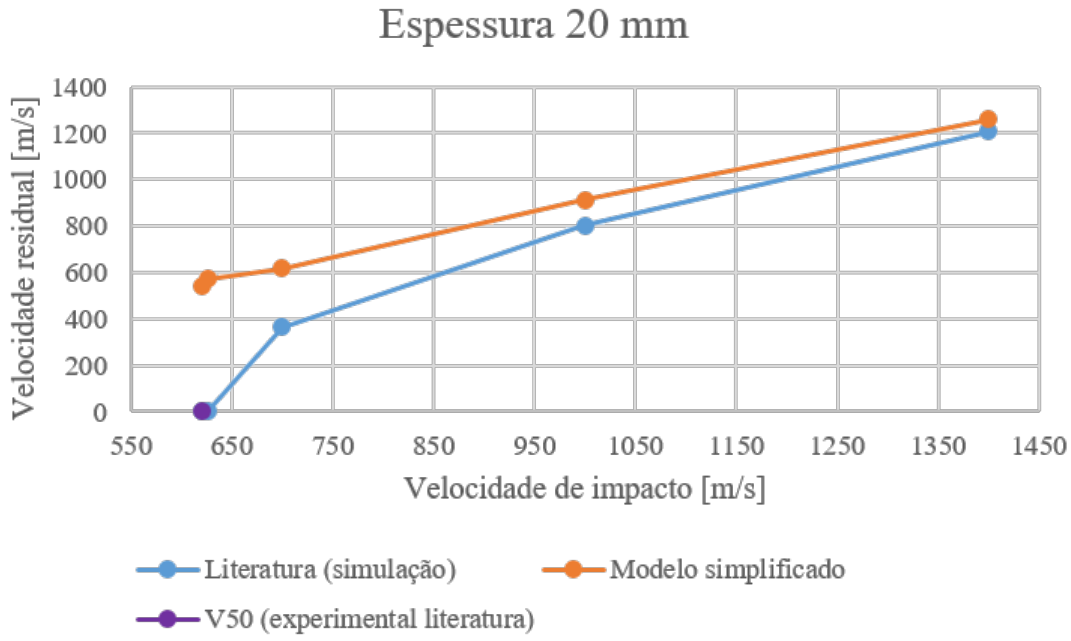


Figura 10: Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 20 mm [63]

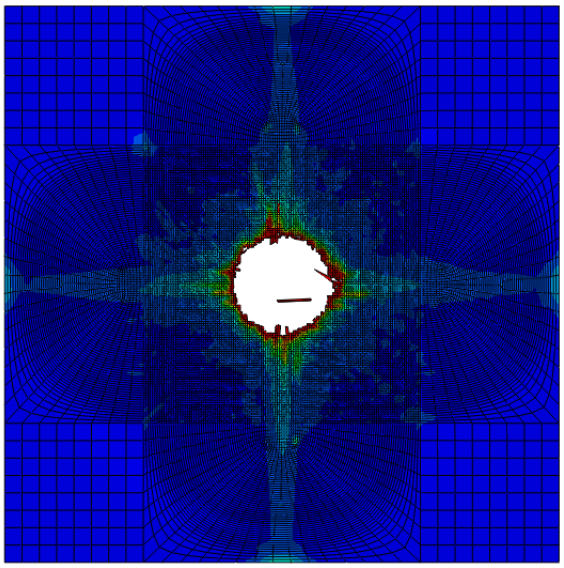


Figura 11: Área danificada num alvo em UHMWPE, com espessura 20 mm, após sofrer colisão por parte de um projétil a 1000 m/s (camada 6)

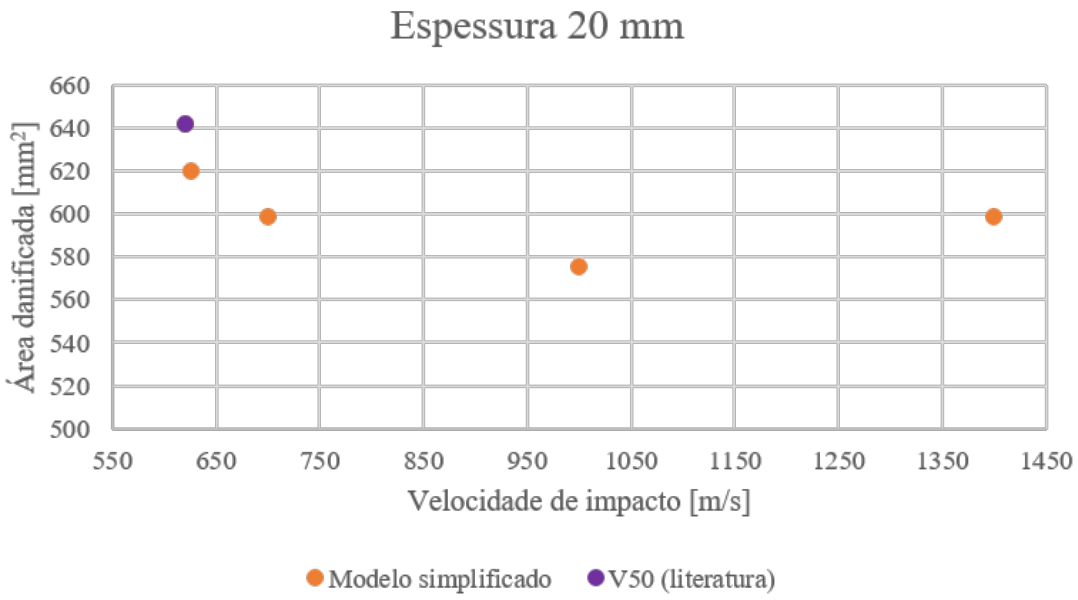


Figura 12: Área danificada num alvo em UHMWPE, com espessura 20 mm, em função da velocidade de impacto

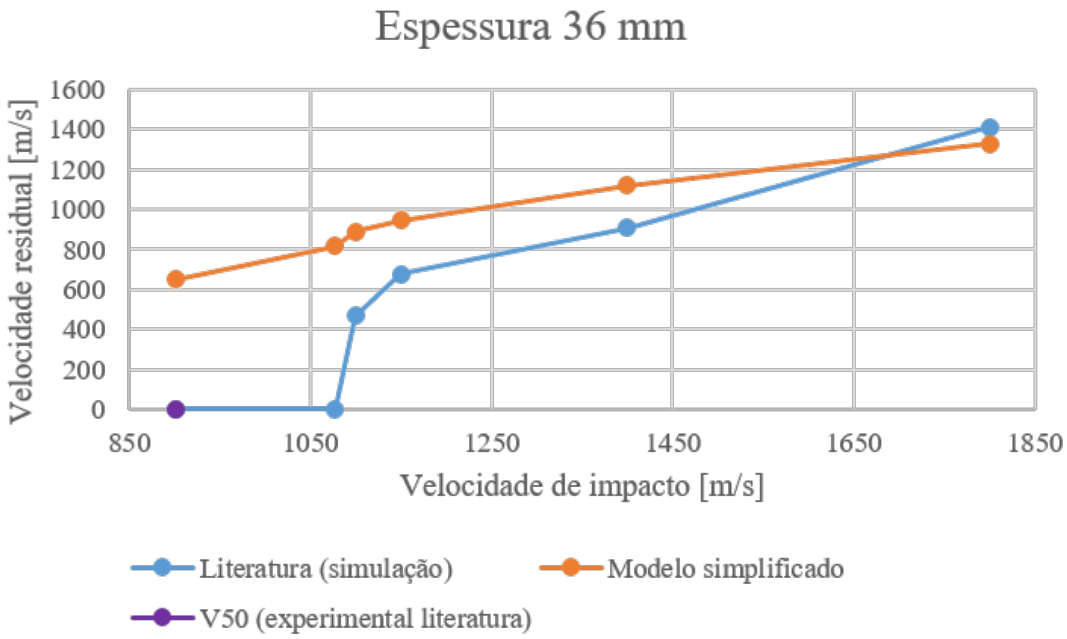


Figura 13: Velocidade residual em função da velocidade de impacto num alvo de UHMWPE de espessura igual a 36 mm [63]

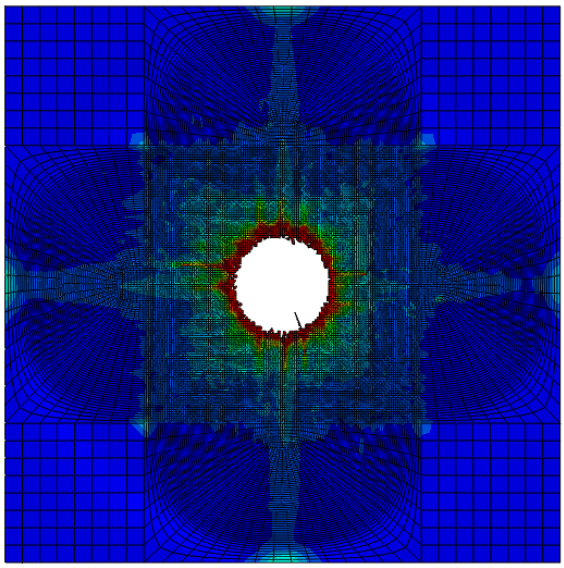


Figura 14: Área danificada num alvo de espessura 36 mm em UHMWPE após colisão com um projétil à velocidade limite balístico obtida experimentalmente (camada 18)

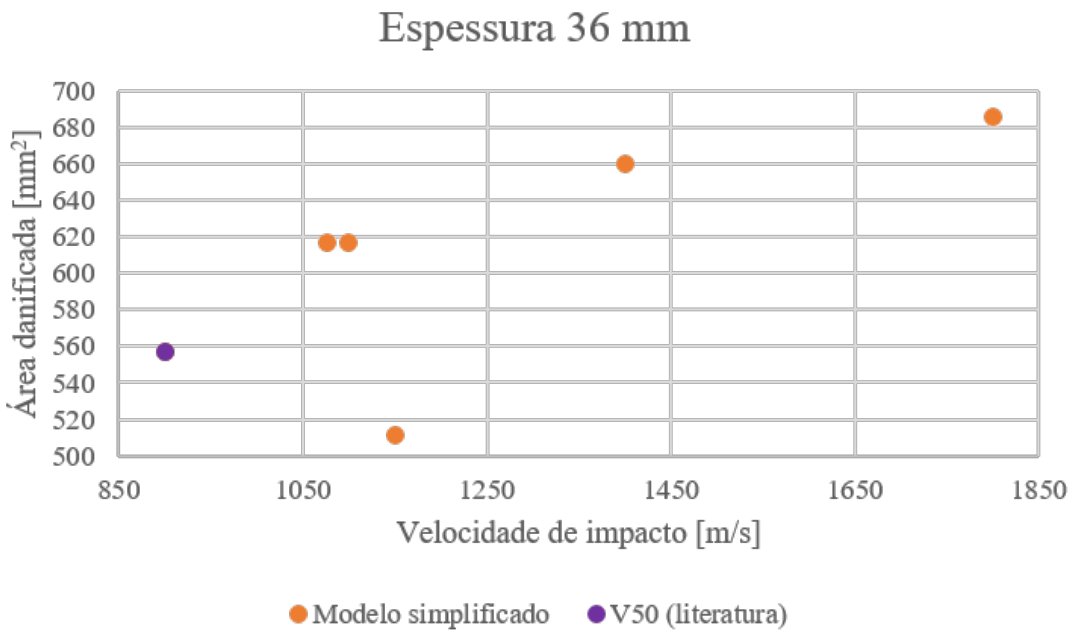


Figura 15: Área danificada em função da velocidade de impacto, num alvo em UHMWPE de espessura 36 mm

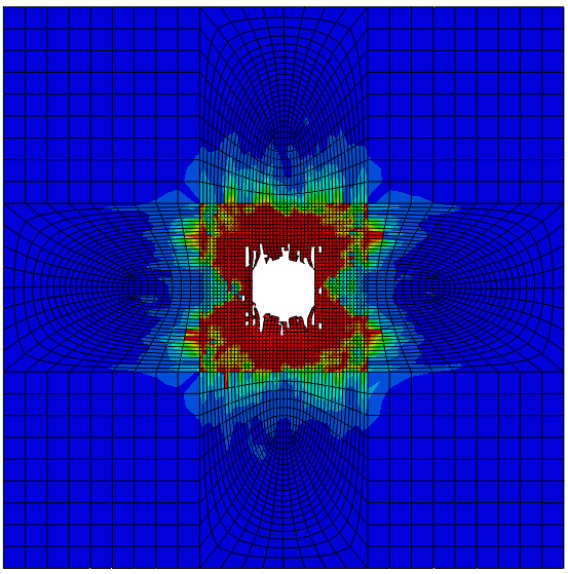


Figura 16: Área danificada na nona camada de um alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura 3 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre a 415 m/s

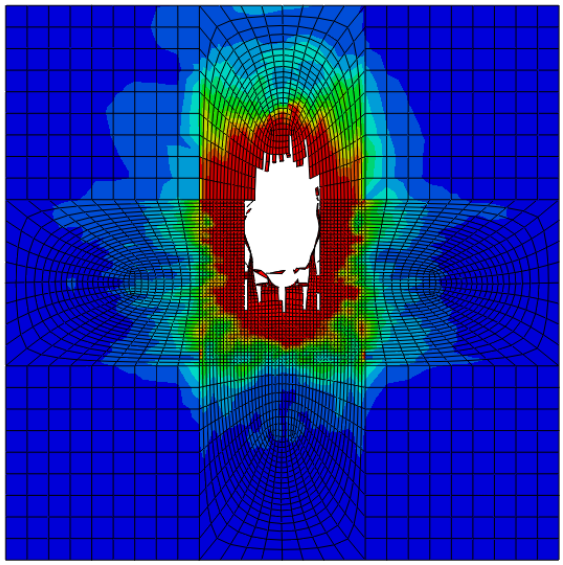


Figura 17: Área danificada de um alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura 3 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre num ângulo de 30° (camada 11)

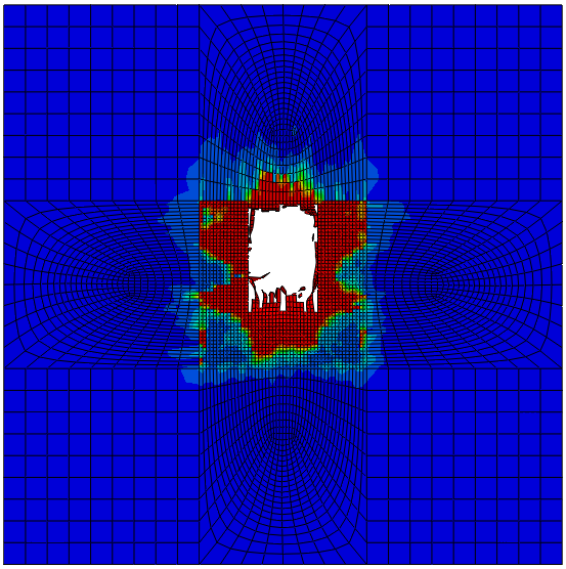


Figura 18: Área danificada na quinta camada de um alvo em E-Glass/resina epoxídica de espessura 3 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre num ângulo de 45°

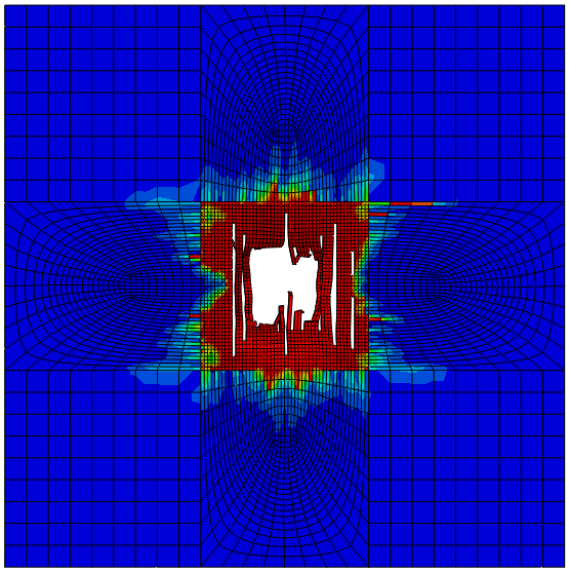


Figura 19: Área danificada na décima camada de um alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura 5 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre a uma velocidade de 415 m/s

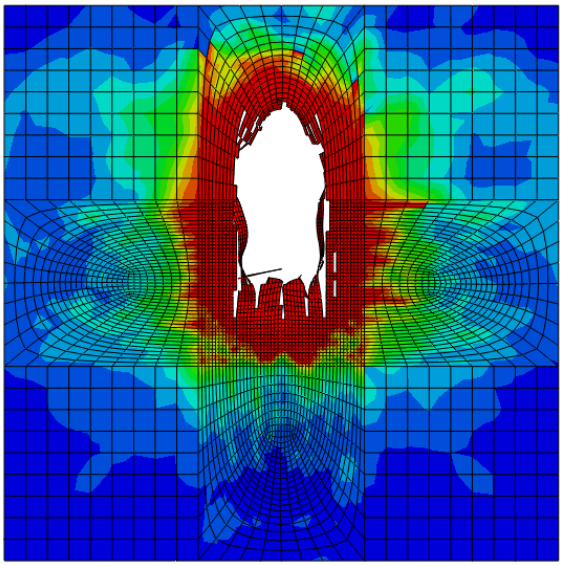


Figura 20: Área danificada na primeira camada de um alvo em E-Glass/resina epoxídica de espessura 5 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre num ângulo de 30°

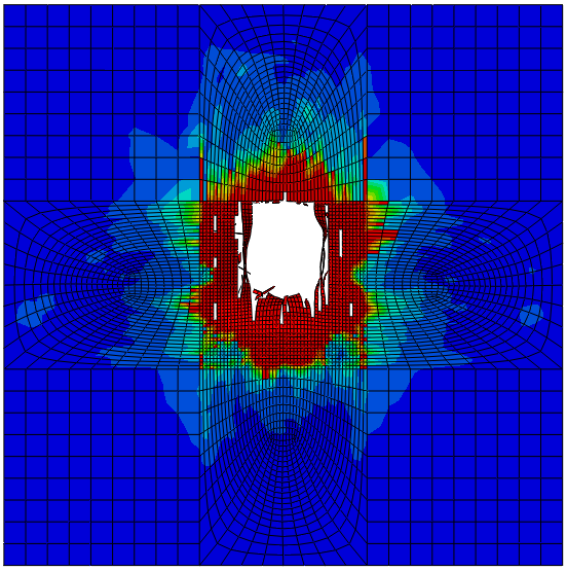


Figura 21: Área danificada de um alvo em E-Glass/resina epoxídica de espessura 5 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre num ângulo de 45° (camada 6)

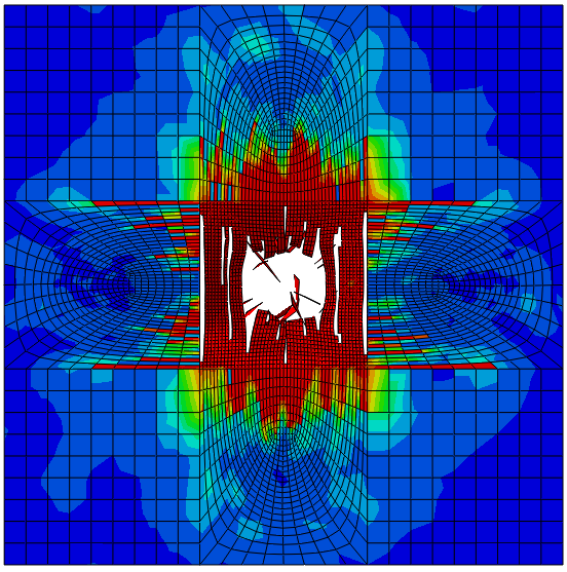


Figura 22: Área danificada de um alvo em E-Glass/resina de epóxido de espessura 7 mm após sofrer impacto de um projétil em cobre a uma velocidade de 415 m/s num ângulo de 0° (camada 20)

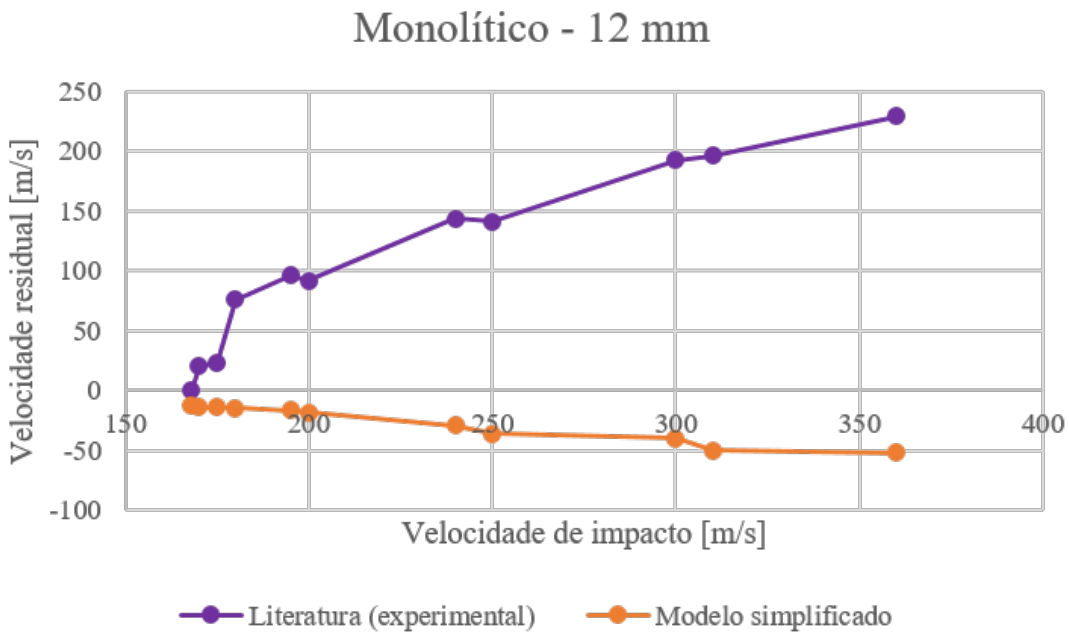


Figura 23: Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil após colisão com um alvo monolítico de 12 mm de espessura em Weldox 700 E [33]

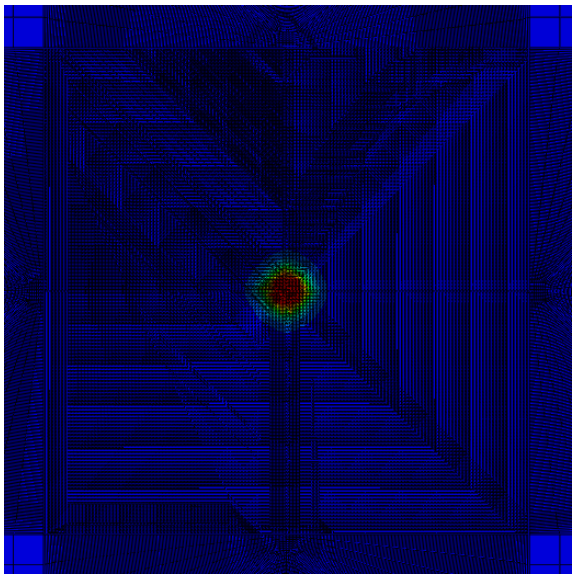


Figura 24: Área danificada de um alvo monolítico de espessura 12 mm em Weldox 700 E após sofrer colisão de um projétil em aço endurecido a uma velocidade de 175 m/s

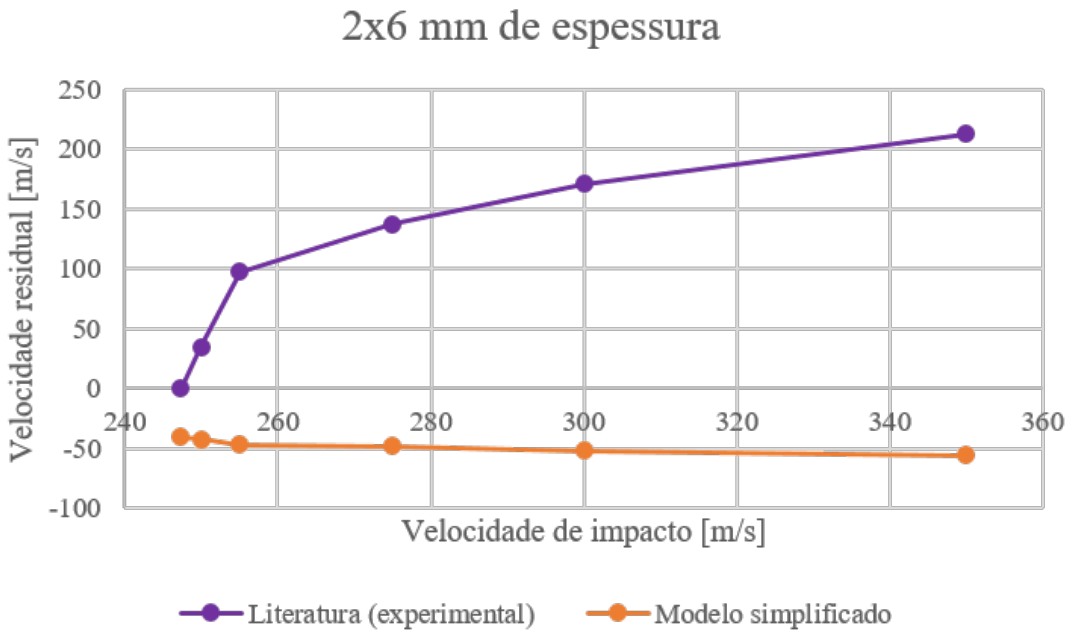


Figura 25: Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil após colisão com um alvo em Weldox 700 E de duas camadas com 6 mm de espessura cada [33]

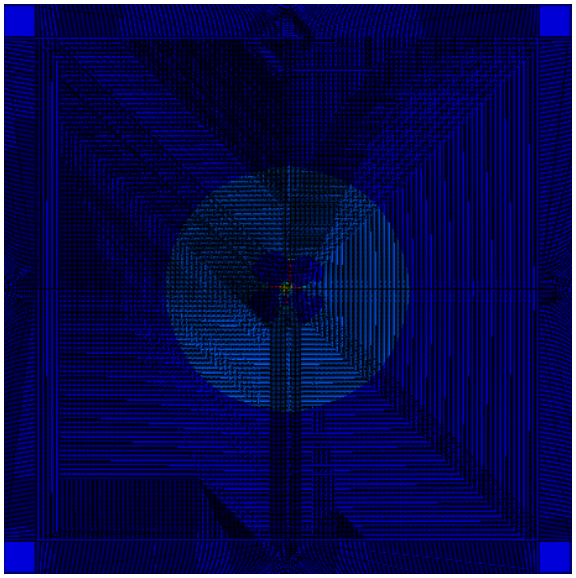


Figura 26: Área danificada de um alvo de duas camadas em Weldox 700 E após sofrer colisão de um projétil em aço endurecido a uma velocidade de 350 m/s

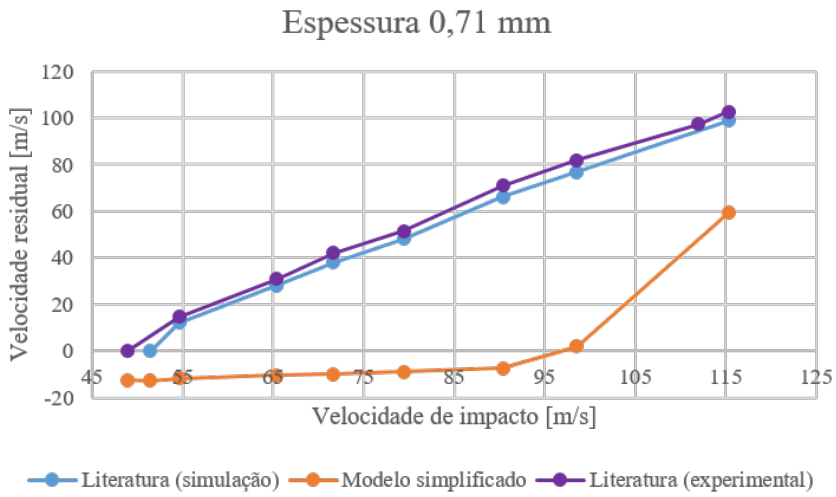


Figura 27: Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil num alvo de espessura 0.71 mm em alumínio 1100-H12 [40]

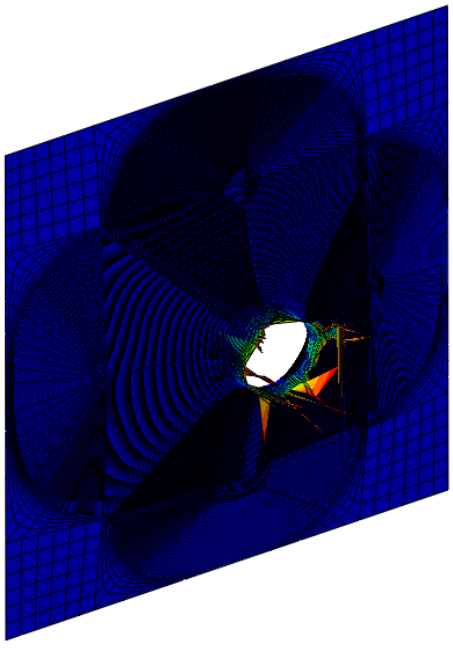


Figura 28: Área danificada de um alvo de espessura 0.71 mm em alumínio 1100-H12 após sofrer colisão de um projétil com velocidade igual a 115.312 m/s

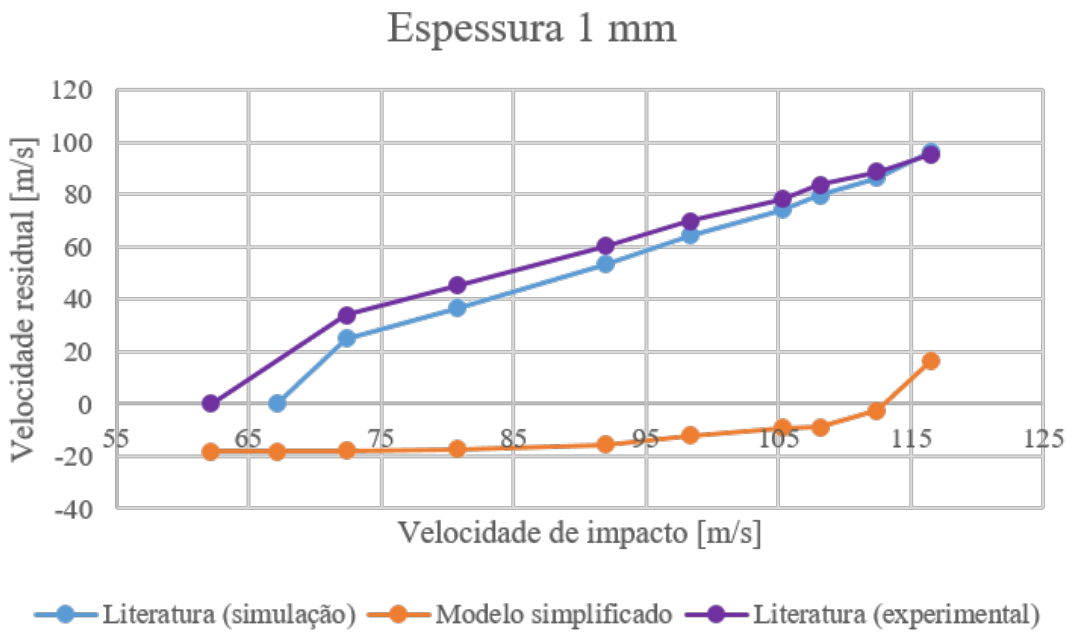


Figura 29: Velocidade residual de um projétil em função da velocidade de impacto após colisão com um alvo em alumínio 1100-H12 de espessura igual a 1 mm [40]

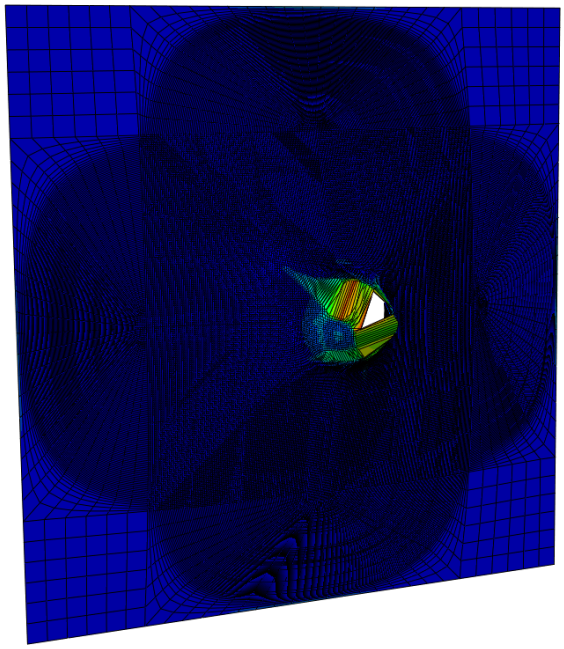


Figura 30: Área danificada num alvo de espessura 1 mm, em alumínio 1100-H12, após sofrer colisão por parte de um projétil a 108.131 m/s

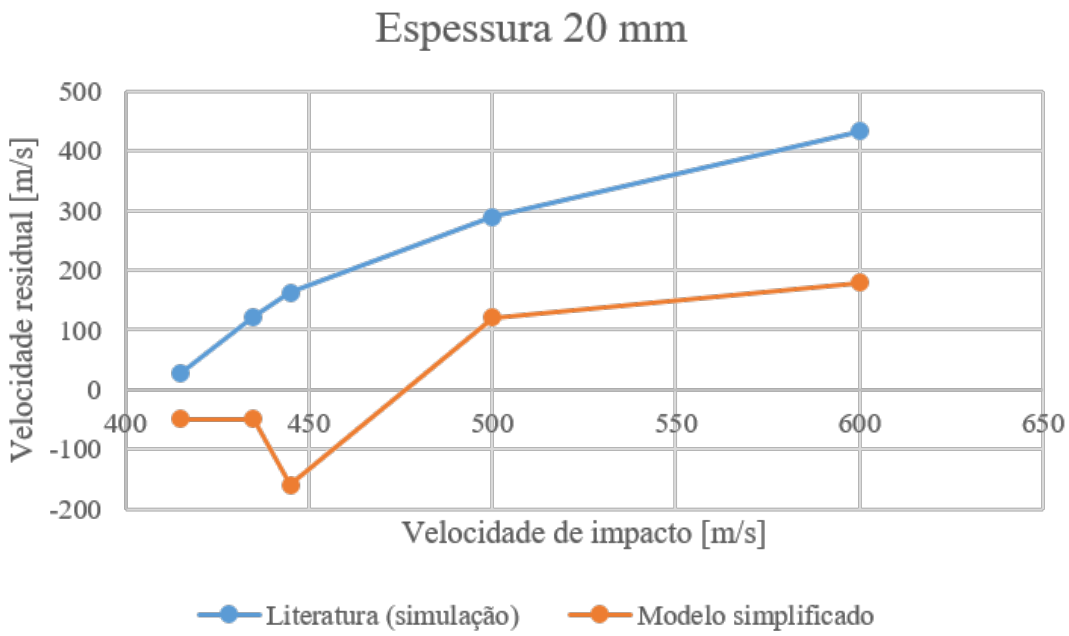


Figura 31: Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio num alvo em alumina/alumínio de espessura 20 mm [25]

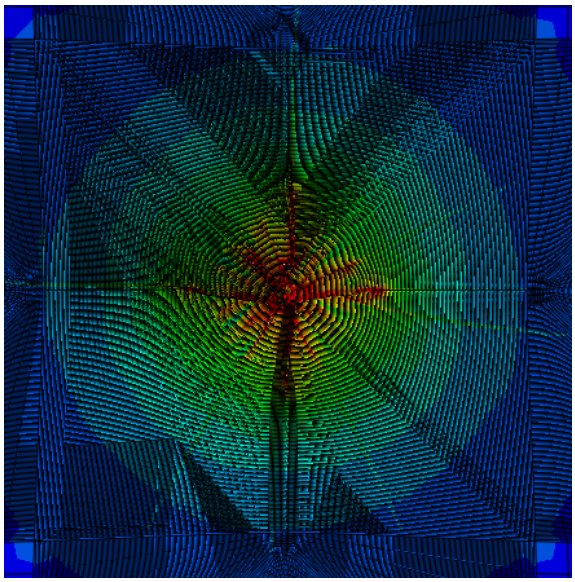


Figura 32: Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/alumínio 5083-H116, de espessura 20 mm, após sofrer colisão de um projétil em tungsténio a 445 m/s (camada de alumínio)

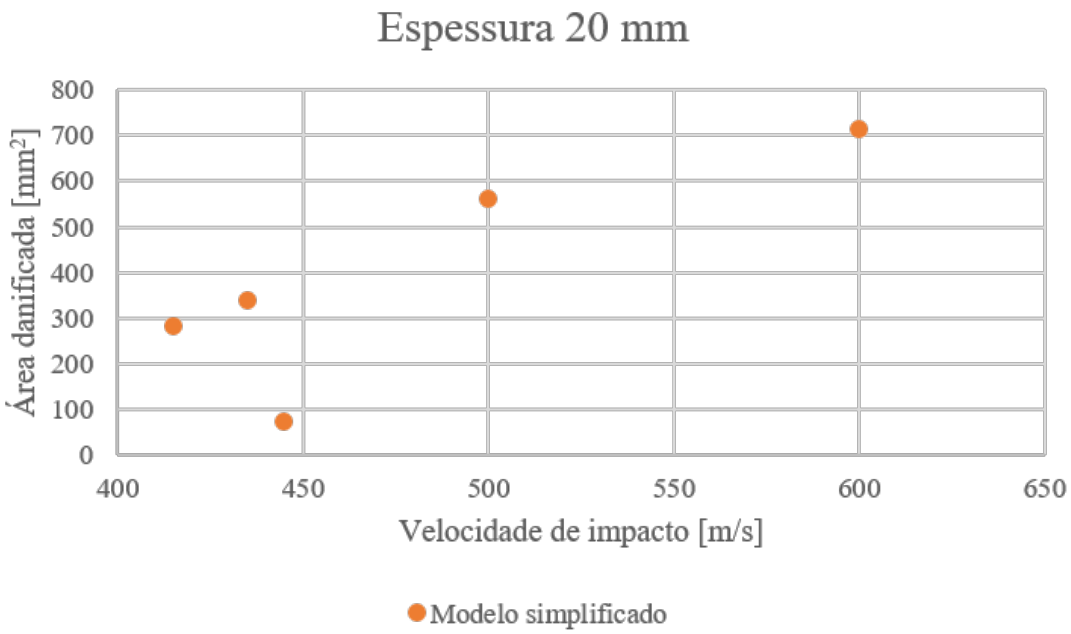


Figura 33: Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/alumínio 5083-H116 em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio (espessura 20 mm) [25]

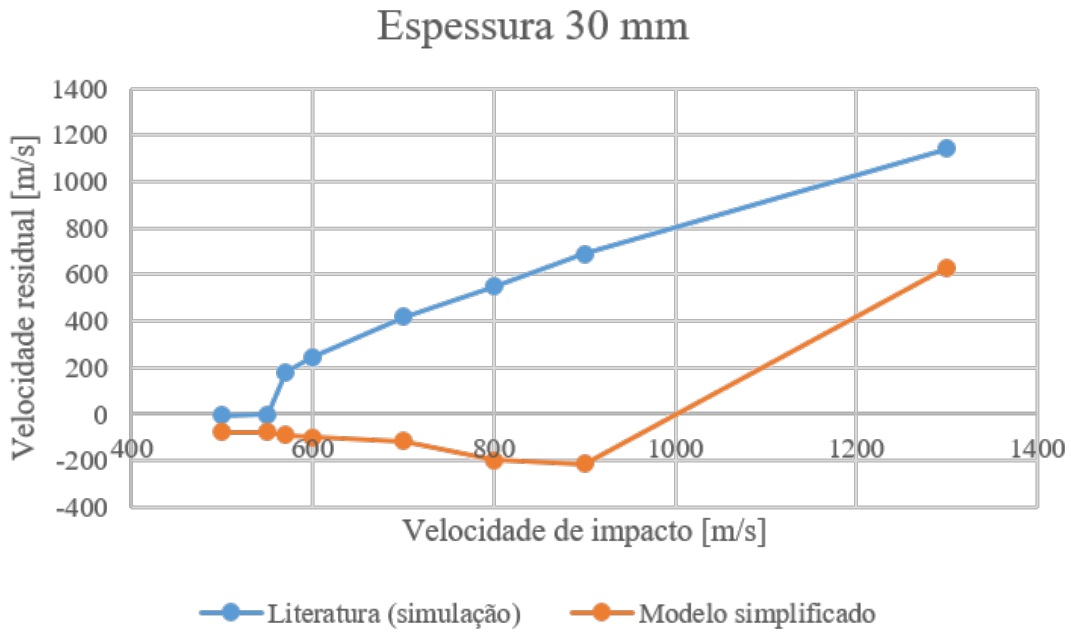


Figura 34: Velocidade residual em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio num alvo em alumina/alumínio de espessura 30 mm [25]

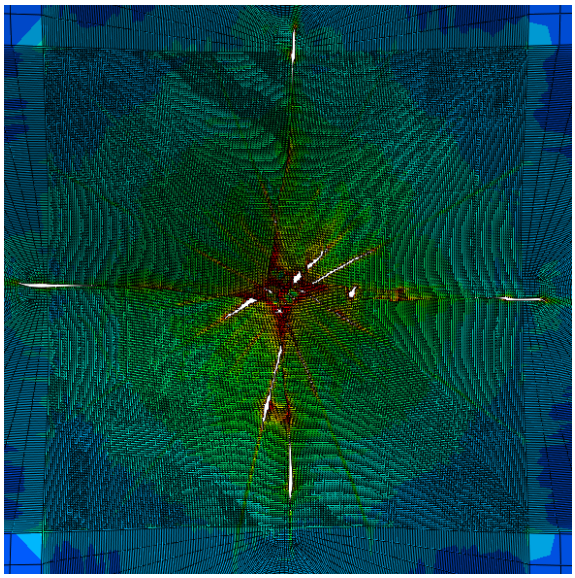


Figura 35: Área danificada de um alvo, de espessura 30 mm, em alumina 99.5%/alumínio 5083-H116, após sofrer colisão de um projétil em tungsténio a 550 m/s (camada de alumínio)

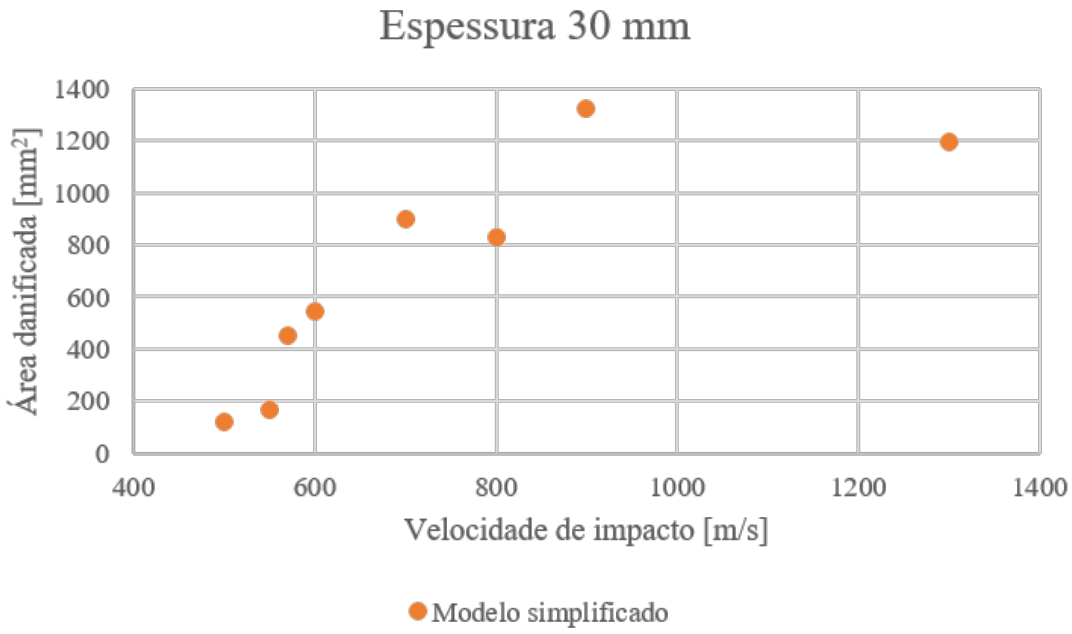


Figura 36: Área danificada de um alvo em alumina 99.5%/alumínio 5083-H116 (espessura 30 mm), em função da velocidade de impacto de um projétil em tungsténio [25]

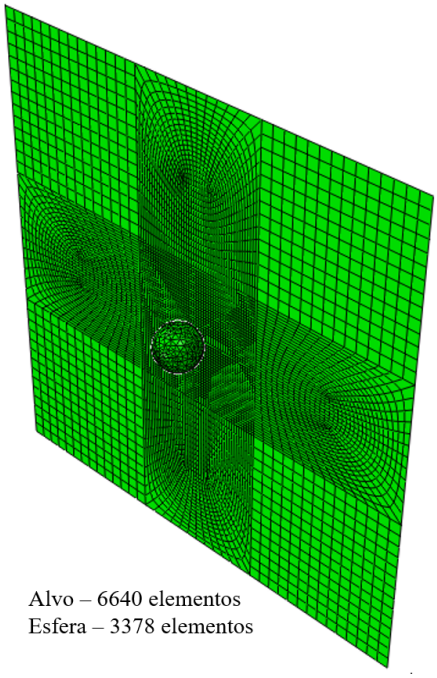


Figura 37: Instante inicial do impacto de um projétil de diâmetro 7.62 mm num alvo em IM7-8552

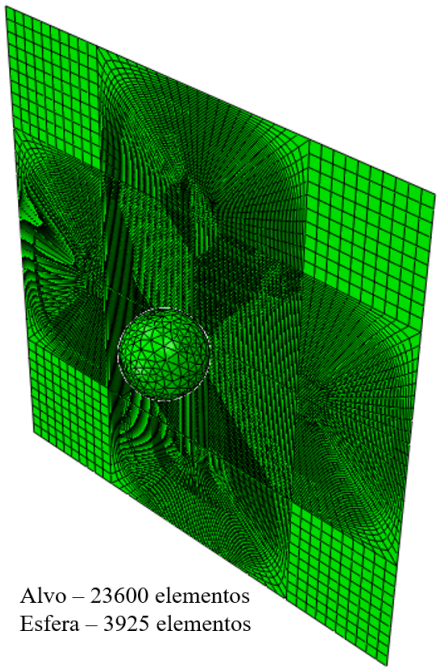


Figura 38: Instante inicial do impacto de um projétil de diâmetro 20 mm num alvo em IM7-8552

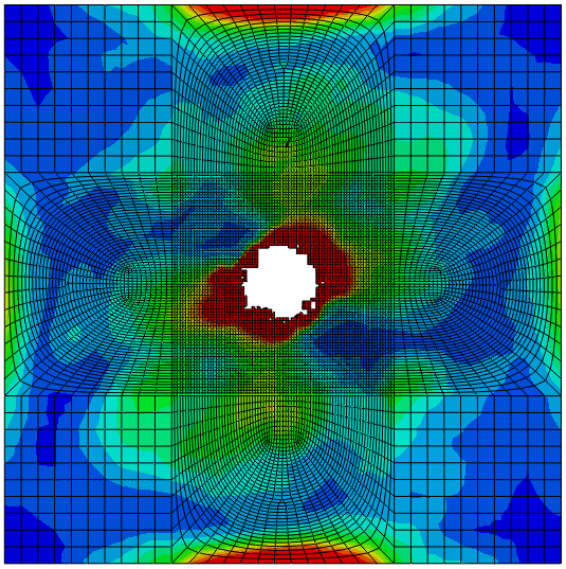


Figura 39: Área danificada da primeira camada de um alvo de IM7-8552 após sofrer colisão a 100 m/s por parte de um projétil de diâmetro 12.7 mm

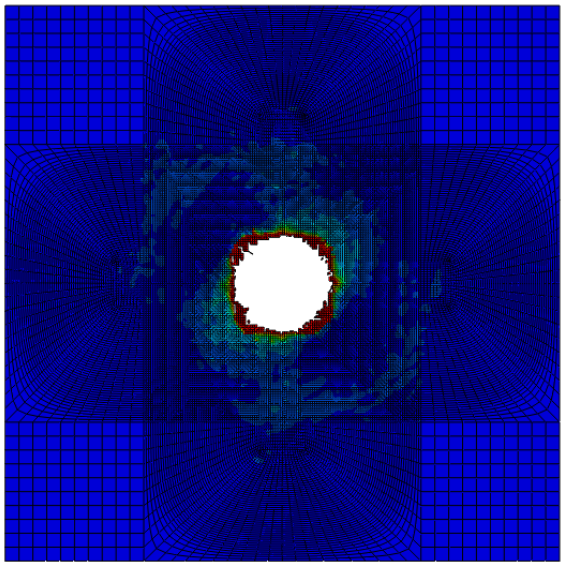


Figura 40: Área danificada da quarta camada de um alvo de IM7-8552 após sofrer colisão a 600 m/s por parte de um projétil de diâmetro 20 mm

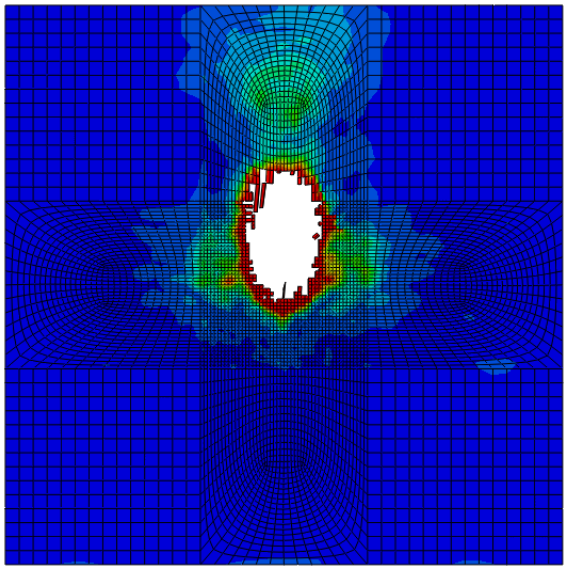


Figura 41: Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão a 900 m/s por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm num ângulo de 30° (camada 3)

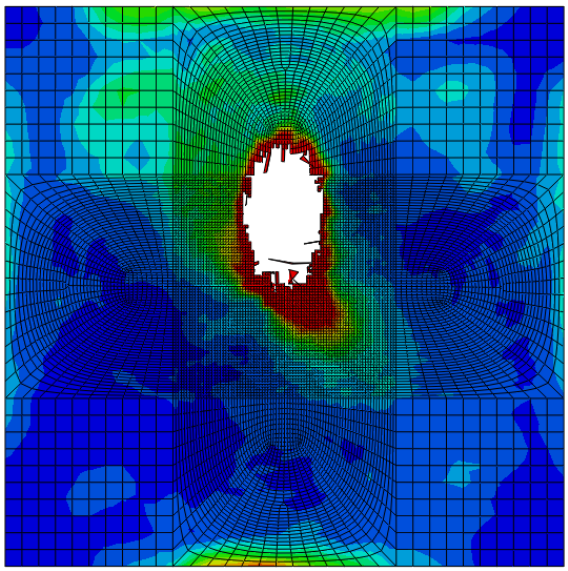


Figura 42: Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão a 200 m/s por parte de um projétil de 12.7 mm de diâmetro num ângulo de 30° (camada 13)

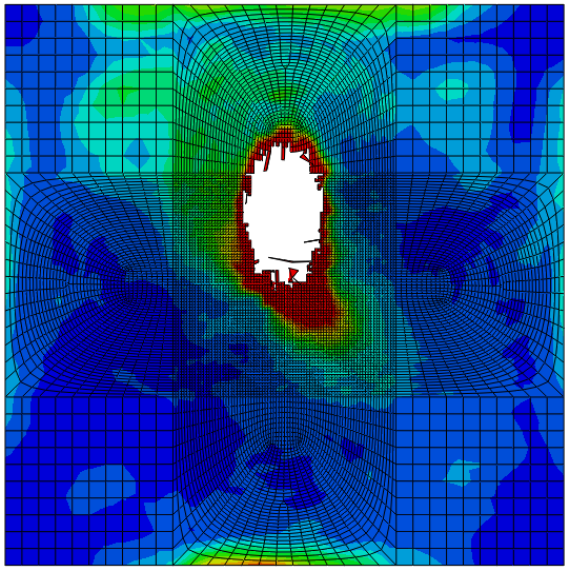


Figura 43: Área danificada num alvo em IM7-8552 após sofrer colisão a 200 m/s por parte de um projétil de 12.7 mm de diâmetro num ângulo de 30° (camada 13)

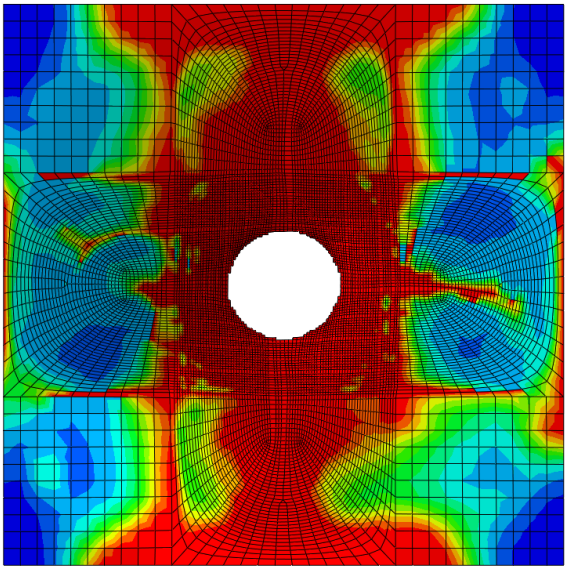


Figura 44: Área danificada na camada 11 de um alvo em IM7-8552 e alumínio quando sofre impacto de um projétil, de diâmetro 12.7 mm, a 400 m/s

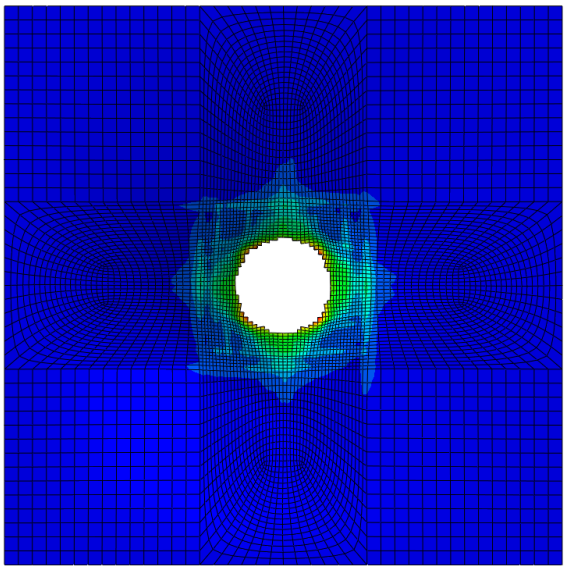


Figura 45: Área danificada na camada de alumínio num alvo em IM7-8552/alumínio quando sofre impacto de um projétil, de diâmetro 7.62 mm, com uma velocidade igual a 600 m/s

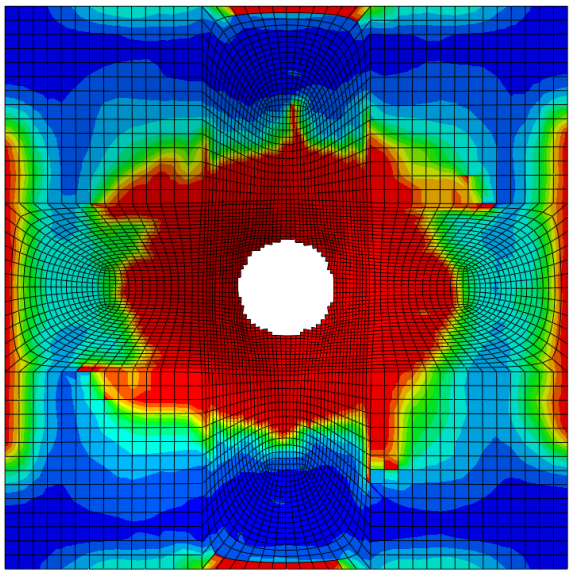


Figura 46: Área danificada na terceira camada de um alvo em IM7-8552/alumínio quando sofre impacto de um projétil, de diâmetro 7.62 mm, com uma velocidade igual a 600 m/s

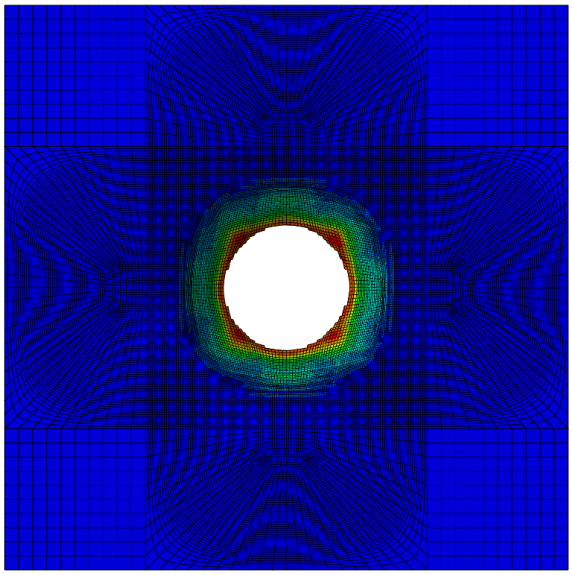


Figura 47: Área danificada num alvo em IM7-8552/alumínio quando sofre impacto de um projétil, de diâmetro 20 mm, a uma velocidade de 900 m/s (camada 14)

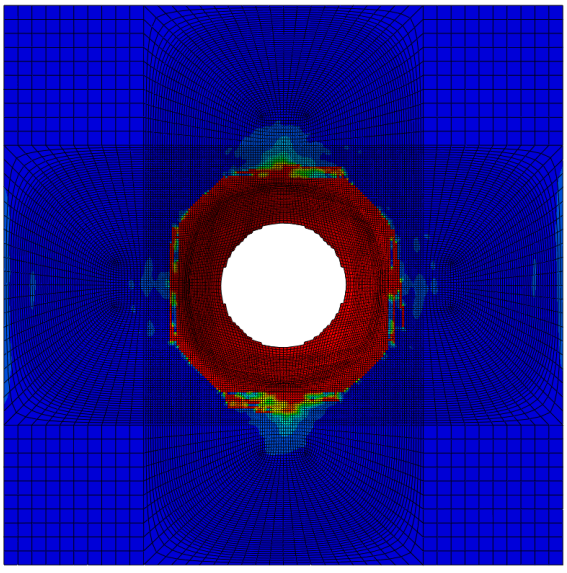


Figura 48: Área danificada na sexta camada de um alvo em IM7-8552/alumínio quando sofre colisão por parte de um projétil, de diâmetro 20 mm, com velocidade 900 m/s

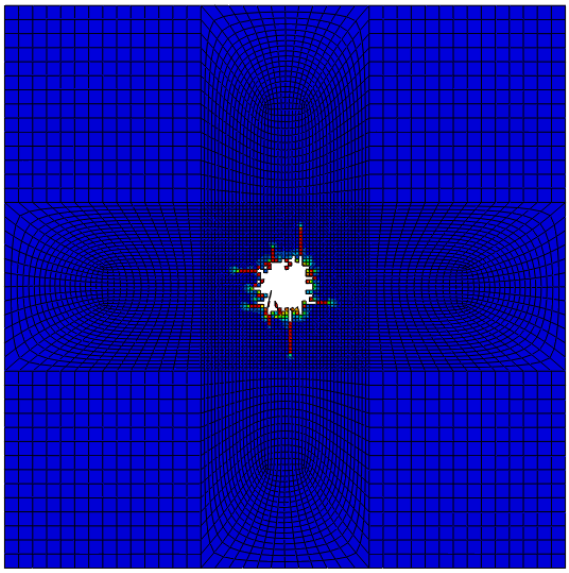


Figura 49: Área danificada na terceira camada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 após colisão por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm a 400 m/s (espessura 15 mm)

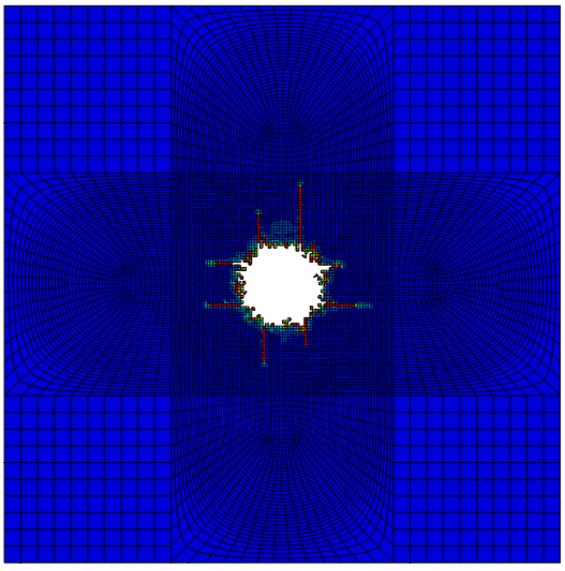


Figura 50: Área danificada na sexta camada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552, com 15 mm de espessura, após colisão por parte de um projétil de diâmetro 12.7 mm a 600 m/s

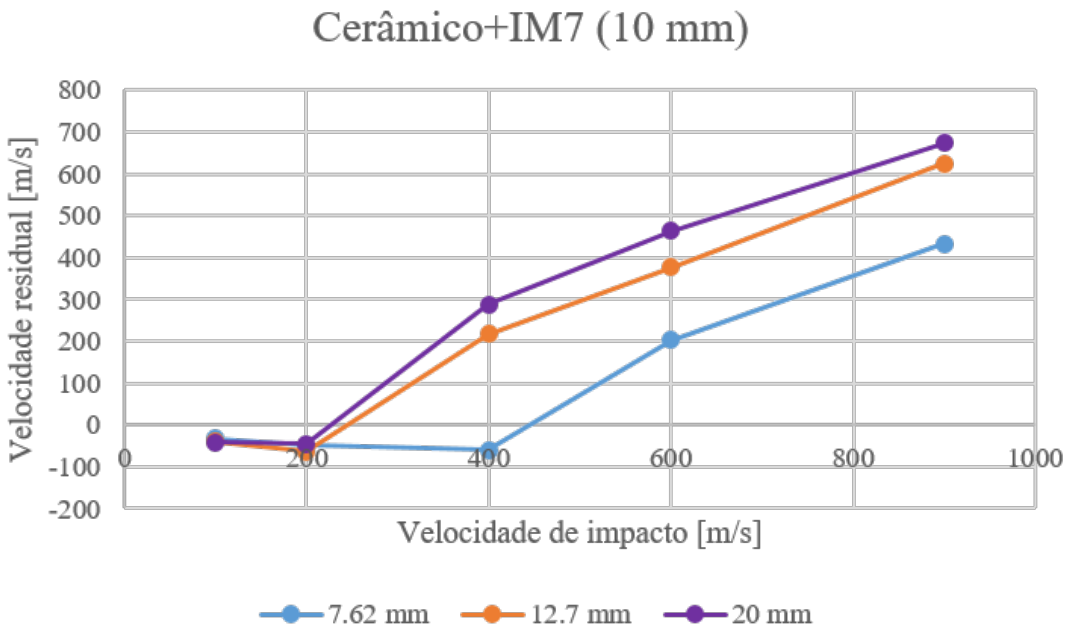


Figura 51: Velocidade residual de um projétil em função da velocidade de impacto deste num alvo de espessura 10 mm em carboneto de silício e IM7-8552

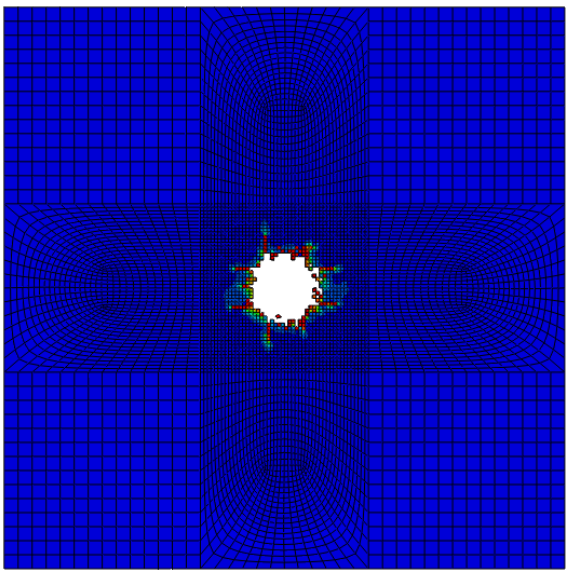


Figura 52: Área danificada na sexta camada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552, de espessura 10 mm, após colisão por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm a 600 m/s

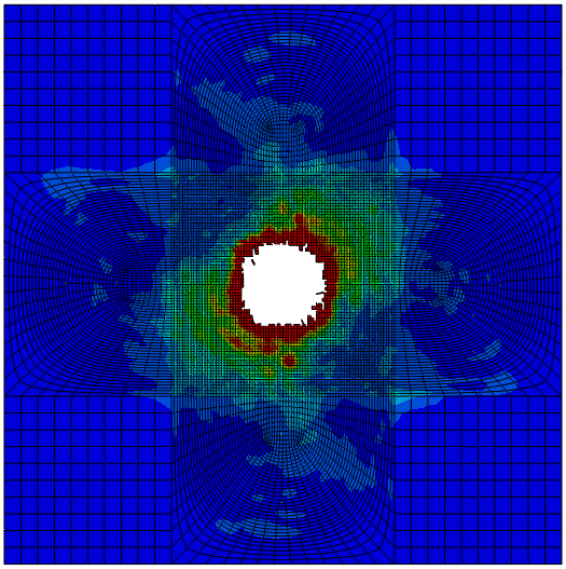


Figura 53: Área danificada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 após colisão por parte de um projétil de diâmetro 12.7 mm a 900 m/s (camada 12)

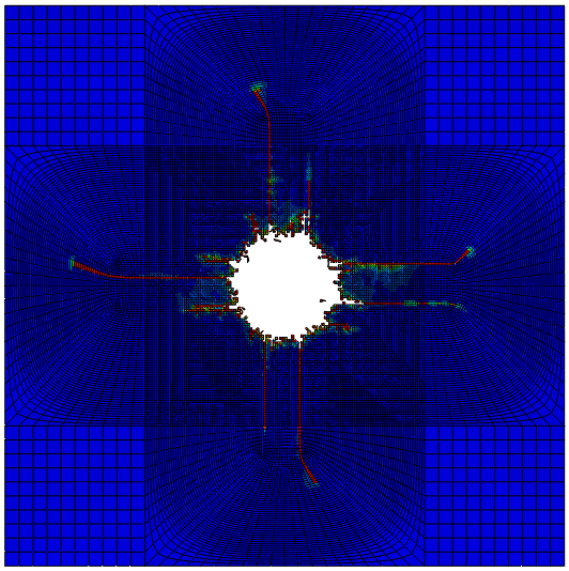


Figura 54: Área danificada de um alvo em carboneto de silício/IM7-8552 após colisão por parte de um projétil de diâmetro 20 mm a 400 m/s (camada 11)

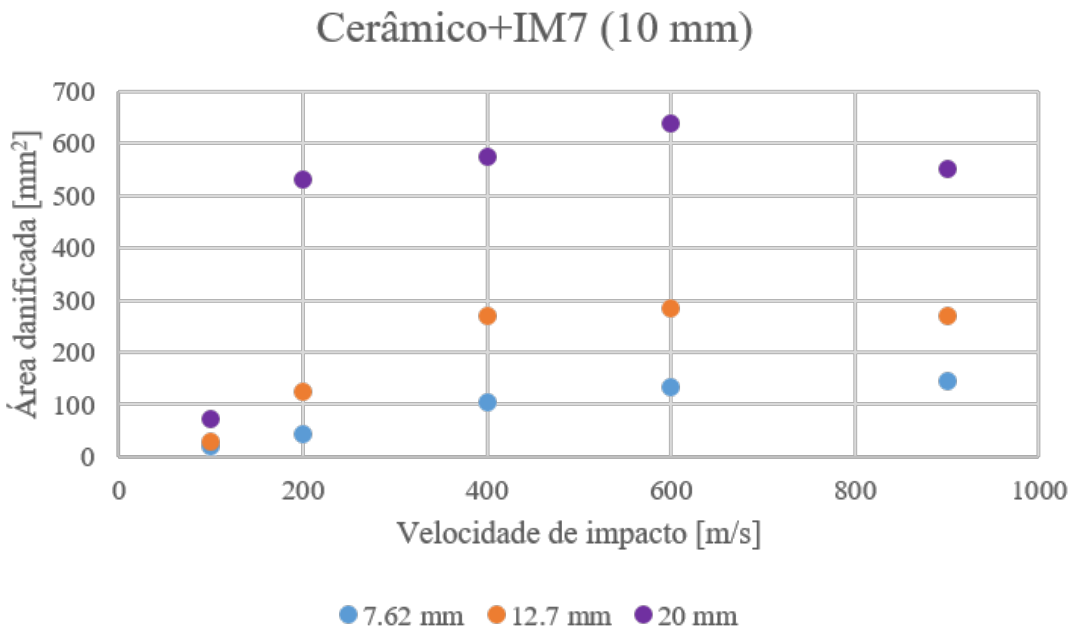


Figura 55: Área danificada de um alvo, de espessura 10 mm, em carboneto de silício e IM7-8552 em função da velocidade de impacto de diferentes projéteis

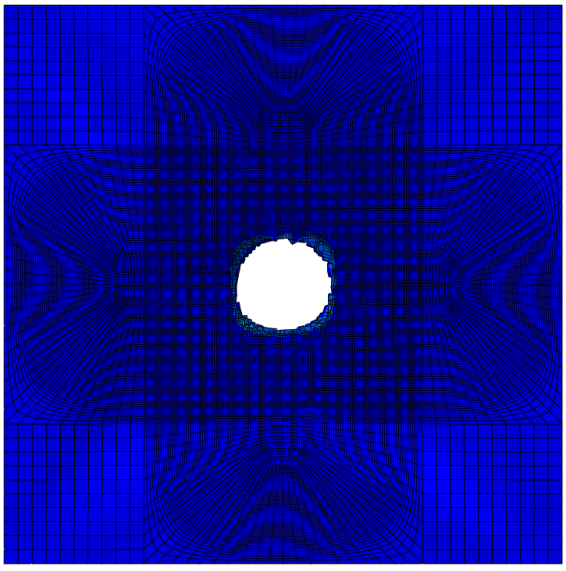


Figura 56: Área danificada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio após sofrer impacto por parte de um projétil de diâmetro 20 mm com uma velocidade de 900 m/s (última camada)

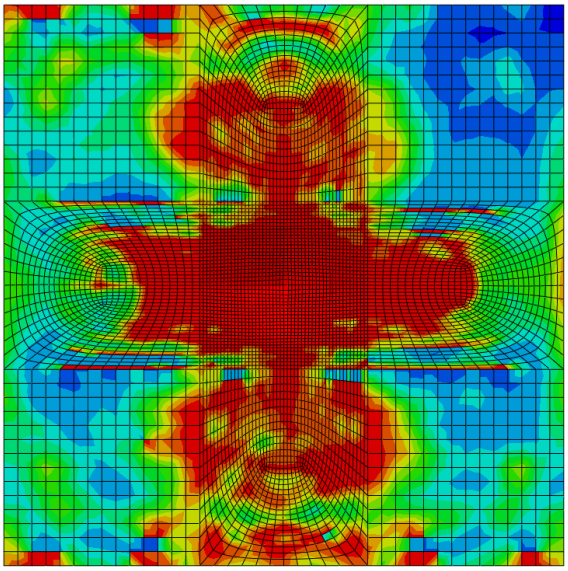


Figura 57: Área danificada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio após sofrer impacto por parte de um projétil de diâmetro 7.62 mm com uma velocidade de 600 m/s (camada 8)

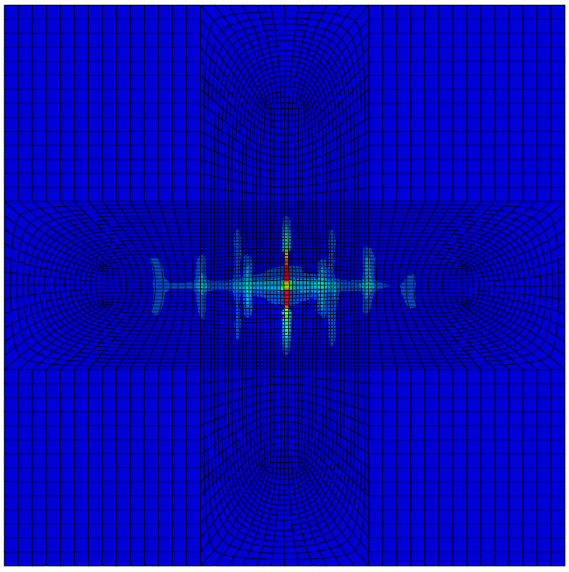


Figura 58: Área danificada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio após colisão com um projétil de diâmetro 7.62 mm a uma velocidade de 600 m/s (camada de alumínio)

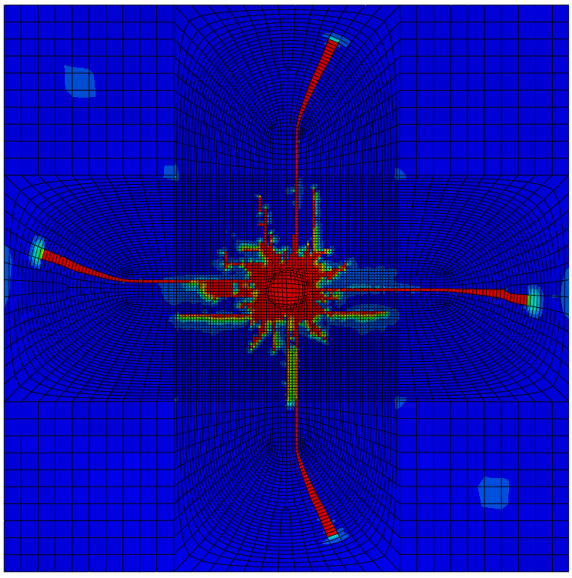


Figura 59: Área danificada na oitava camada de um alvo em SiC, IM7-8552 e Al após sofrer impacto de um projétil de 12.7 mm a uma velocidade de 400 m/s

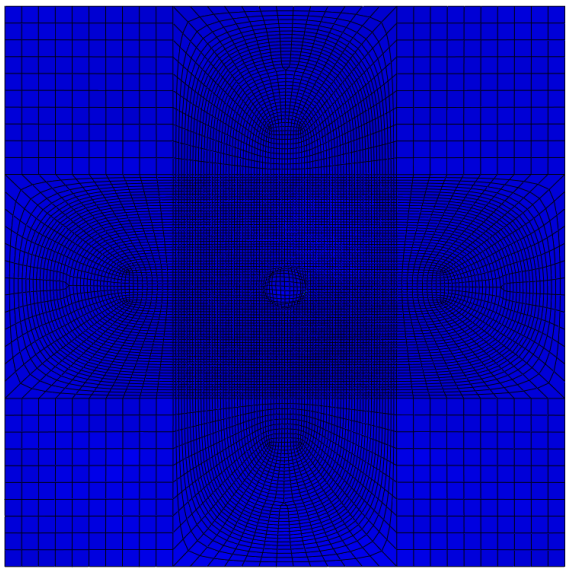


Figura 60: Área danificada na última camada de um alvo em carboneto de silício, IM7-8552 e alumínio, após sofrer impacto de um projétil de 12.7 mm a uma velocidade de 400 m/s

Anexo B: Ficheiro de *input* utilizado na modelação dos materiais cerâmicos

```
1
2  ** MATERIALS
3  **
4  ********************************************************************************
5  *parameter
6  rho0 = 3.215e-9
7  G = 193000.
8  A = 0.96
9  N = 0.65
10 B = 0.35
11 M = 1.0
12 C = 0.009
13 edot0 = 1.0
14 T = 750
15 sigIMax = 12200
16 sigFMax = 1300
17 HEL = 11700
18 PHEL = 5130
19 beta = 1.0
20 D1 = 0.48
21 D2 = 0.48
22 efMax = 1.2
23 efMin = 0.0
24 K1 = 220000
25 K2 = 361000
26 K3 = 0.0
27 FS = 0.2
28 lDamage = 0
29 *Material, name=abq_jh2_siliconcarbide
30 *density
31  <rho0>
32 *user material, constants=32
33  <rho0>, <G>, <A>, <N>, <B>, <M>, <C>, <edot0>
34  <T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
```

```
 <D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <lDamage>
 <K1>, <K2>, <K3>
*DEPVAR, DELETE=8
8
1, PEEQ , "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT , "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE , "Damage variable"
5, DELTAP , "Pressure increment due to bulking"
6, YIELD , "Yield strength"
7, EVOL    , "Volumetric Strain, Mu"
8, MPSTATUS , "Material point status"
**********************************************************************************
```