



Rodrigo Ferreiro  
Fernandes Mourão

Desempenho de proteção de sistemas têxteis  
flexíveis





**Rodrigo Ferreiro  
Fernandes Mourão**

**Desempenho de proteção de sistemas têxteis  
flexíveis**

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



**O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor João Alexandre Dias de Oliveira**  
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof.<sup>a</sup> Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira**  
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

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



## **Agradecimentos / Acknowledgements**

Professor Teixeira-Dias, a sua orientação, disponibilidade permanente, paciência e conhecimentos determinaram o rumo desta dissertação. As minhas palavras nunca serão suficientes para expressar a minha gratidão pelo empenho e amizade que me entregou. A si!

Ana Azevedo, a tua colaboração revelou-se imprescindível para o arranque e manutenção do ritmo deste trabalho. Obrigado!

Professor Robertt, a sua contribuição dotou este trabalho de características inalcançáveis de outro modo. Obrigado!

Uma palavra de agradecimento à Royal Military Academy (Bruxelas), como instituição, pela cedência de material indispensável à realização desta dissertação.

Aos meus pais, um sincero obrigado pelo incansável apoio e motivação.

Andreia, o teu encorajamento, colaboração e dedicação foram, como serão, determinantes no meu percurso. Eternamente grato por tanto!





## Palavras-chave

Têxteis flexíveis; proteção pessoal; materiais celulares; simulação numérica; método dos elementos finitos; impacto; facada

## Resumo

A avaliação da capacidade de proteção de sistemas têxteis flexíveis contra ameaças envolvendo armas brancas e objetos cortantes é colocada em primeiro plano neste trabalho. Foram realizados estudos numéricos, recorrendo ao método dos elementos finitos (MEF), no sentido de avaliar a influência da variação do número de camadas de Kevlar-29<sup>®</sup> (com 0.1 mm de espessura cada), constituinte dos coletes de proteção de torso, na capacidade de proteção contra a faca PSDB/S1/G, utilizada pela norma de certificação de equipamentos de proteção NIJ-0115.00 Este estudo foi realizado para alvos com camadas alinhadas e para alvos com camadas desencontradas, concluindo que a capacidade de proteção é relativamente maior nos alvos em que as camadas surgem desencontradas ao longo da sua espessura. Verificou-se ainda que o coeficiente de atrito nas interfaces tecido-faca e tecido-tecido apresenta uma grande influência no fenómeno físico. As características mecânicas da cortiça (baixa densidade e elevada rigidez específica) apontam para que este material seja um bom candidato à introdução no alvo. Foi, portanto, inserida cortiça sob a forma de micro-aglomerado e avaliado o efeito da variação do número de placas de cortiça, para a mesma espessura. Observou-se que a capacidade de proteção do alvo sai claramente beneficiada com a utilização de uma placa de cortiça, quando comparada com a utilização de várias placas com a mesma espessura total. No seguimento disto, foi também realizada uma comparação de várias configurações do alvo, mantendo a mesma quantidade (número de camadas de tecido e espessura de cortiça) de cada um dos dois materiais, observando que a face de ataque do alvo é a que mais influência tem na capacidade de proteção do mesmo, pelo que um aumento da quantidade de tecido nesta face revela resultados significativamente piores ao nível de dissipação de energia que o aumento na face oposta e no interior do alvo, que se aproximam. Por fim, foram realizadas algumas comparações com a finalidade de perceber se a cortiça apresenta vantagens, de uma forma genérica, na capacidade de proteção do alvo. Neste caso, verificou-se que a introdução deste material celular, com espessura de 0.6 mm, resultou em reduções de penetração da faca que rondam os 36% e 50%, para ensaios com duas e três camadas de tecido, respetivamente.



**Keywords**

Flexible textiles, body armour, cellular materials, numerical simulation, finite element method, impact, stab

**Abstract**

Assessing the protection performance of flexible textile systems against threats involving bladed weapons and sharp objects was the main focus of the work here presented. A set of numerical analyses were performed using the finite element method (FEM) in order to evaluate the influence of changing the number of layers of Kevlar<sup>®</sup> (0.1 mm thick each), a constituent of body vests, on the ability to protect against knife impacts. The impactor used was the PSDB/S1/G knife, in accordance to the NIJ-0115.00 standard. This study was conducted with targets with both aligned and unaligned layers, leading to the conclusion that the protective capacity is higher for targets with unaligned layers. It was also found that the coefficients of friction of the pairs knife-fabric and fabric-fabric have a great influence on the mechanical response of the system. Some mechanical properties of cork (low density and high specific stiffness and strength) suggest that this material is a good candidate for personal protection applications. Therefore, tests were made where cork micro-agglomerate (MAC) was considered as an additional layer (or layers) of the target. The effect of changing the configuration of the cork layers was evaluated. It was observed that the protection ability of the target clearly benefits if only one MAC layer is used, as compared to multiple layers (for the same overall thickness). A comparative study was also made to evaluate the performance of different target arrangements. It was observed that the stiffness of front target surface plays the most important role in the protection ability of the full target system. Finally, comparisons were made in order to understand if cork micro-agglomerates could be used and have advantages in the protection performance of flexible textile personal protection vests. It was found that the introduction of MAC with a thickness as high as 0.6 mm resulted in a reduction of penetration of the knife of approximately 36% and 50% for targets with two and three layers of Kevlar, respectively.



# Conteúdo

<b>I</b>	<b>Introdução e estado-da-arte</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Motivação e objetivos</b>	<b>3</b>
1.1	Motivação . . . . .	3
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.3	Guia de leitura . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Ameaças e proteção pessoal</b>	<b>7</b>
2.1	Revisão histórica . . . . .	7
2.2	A ameaça . . . . .	12
2.3	Revisão bibliográfica . . . . .	14
2.4	Testes normalizados . . . . .	16
2.4.1	NIJ 0115.00 — <i>Stab resistance standard for personal body armour</i> .	16
2.4.2	HOSDB — <i>Knife and spike resistance</i> . . . . .	18
2.4.3	Corpo de polícia Suíça e Alemã — Testes de resistência contra facada	20
<b>3</b>	<b>Tecidos flexíveis e o seu papel na proteção</b>	<b>23</b>
3.1	Os tecidos flexíveis . . . . .	23
3.1.1	Constituição dos tecidos . . . . .	23
3.1.2	Composições elementares . . . . .	24
3.1.3	Morfologia e estrutura tridimensional . . . . .	26
	Abordagens bidimensionais para representação de tecidos . . . . .	26
	Representação tridimensional de tecidos . . . . .	28
3.1.4	Propriedades mecânicas . . . . .	31
3.2	O Kevlar <sup>®</sup> . . . . .	33
3.2.1	Propriedades e estrutura molecular . . . . .	33
3.2.2	O Kevlar-29 <sup>®</sup> . . . . .	34
3.2.3	Aplicações do Kevlar <sup>®</sup> . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Materiais celulares</b>	<b>37</b>
4.1	A cortiça como matéria-prima . . . . .	38
4.1.1	Estrutura . . . . .	39
4.1.2	Propriedades mecânicas . . . . .	39
4.1.3	Coefficiente de atrito . . . . .	41
4.2	Micro-aglomerados de cortiça . . . . .	42

<b>II</b>	<b>Métodos e modelos</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>Método dos elementos finitos</b>	<b>47</b>
5.1	Introdução . . . . .	47
5.2	Integração temporal . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Modelação numérica</b>	<b>51</b>
6.1	Descrição geral . . . . .	51
6.2	Modelo da massa de impacto . . . . .	52
6.3	Modelo da faca . . . . .	54
6.4	Modelo do alvo . . . . .	55
6.4.1	Breve revisão bibliográfica . . . . .	55
6.4.2	Modelo do sistema têxtil flexível . . . . .	57
6.4.3	Modelo da cortiça . . . . .	60
6.5	Condições de fronteira . . . . .	62
6.6	Interfaces e contactos entre componentes . . . . .	62
6.7	Modelação de dano na cortiça . . . . .	63
6.8	Breve resumo dos modelos numéricos . . . . .	65
<b>III</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Estudos paramétricos</b>	<b>69</b>
7.1	Validação do modelo numérico . . . . .	69
7.2	Controlo do incremento de tempo . . . . .	71
7.3	Coefficiente de atrito . . . . .	72
7.4	Otimização da energia de impacto . . . . .	73
7.5	Influência do número de camadas de Kevlar-29 <sup>®</sup> . . . . .	75
7.5.1	Camadas alinhadas . . . . .	75
7.5.2	Camadas desalinhadas . . . . .	79
7.6	Influência da cortiça na capacidade de proteção do alvo . . . . .	83
7.7	Influência da configuração do alvo . . . . .	88
7.8	Análise da capacidade de proteção . . . . .	90
<b>8</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>95</b>

## Parte I

# Introdução e estado-da-arte





# Capítulo 1

## Motivação e objetivos

### 1.1 Motivação

Ao aumento da criminalidade está associada uma efetiva necessidade de proteção pessoal. Hoje em dia, em consequência de diversos fatores sociais, a criminalidade violenta apresenta cada vez mais relevância no contexto da criminalidade geral. À parte dos cenários de guerra, onde a proteção individual de cada soldado é de extrema importância, surge cada vez mais a necessidade de proteção das forças de segurança não militarizadas, no sentido de fazer face às crescentes taxas de ameaças que surgem em ambientes públicos de alto risco.

A criminalidade violenta deixou de estar associada ao uso de um tipo de ameaça específico, como as armas de fogo, e passou a estar relacionada com o uso de um leque abrangente de objetos com a finalidade de debilitar a integridade física. Esta questão leva a uma reflexão acerca da forma como as proteções pessoais são desenvolvidas e quais os tipos de ameaça e ambientes para os quais têm a sua finalidade. As forças de segurança, que enfrentam cada vez mais um ambiente de multi-ameaça, apresentam necessidades crescentes de proteção para estes tipos de ameaças. No entanto, o esforço realizado no sentido de colmatar esta necessidade não pode prejudicar a mobilidade de quem utiliza equipamentos de proteção pessoal.

Assim, além da capacidade de proteção contra multi-ameaça, é importante que as proteções pessoais garantam uma boa flexibilidade, no sentido do conforto de quem as utiliza, associada a um baixo peso. A combinação de estes dois pontos abre um espaço a esta investigação no sentido de avaliar a capacidade de proteção de sistemas têxteis flexíveis. Este trabalho traduz-se num excelente desafio de investigação dada a complexidade da avaliação de um fenómeno físico como este, principalmente pela dificuldade de representação que sistemas flexíveis têm geralmente associados, imposta pela interação de diversos componentes com comportamentos que induzem grandes deformações elásticas.

Nos próximos pontos serão abordados os principais objetivos desta dissertação, bem como apresentado um guia auxiliar à leitura deste documento.

### 1.2 Objetivos

O principal objetivo da investigação que sustenta esta dissertação baseia-se em tentar perceber qual a influência de fatores relacionados com a construção de equipamentos de

proteção pessoal, nomeadamente coletes de proteção de torso, quando sujeitos a ameaças menos típicas quando comparadas com armas de fogo, como é o caso do impacto de armas brancas e objetos cortantes.

A planificação intrínseca à investigação leva a que esta seja estruturada em dois estágios principais: (i) avaliação da construção típica de um equipamento desta natureza e (ii) inclusão de materiais celulares, especificamente cortiça sob a forma de micro-aglomerado, no sentido de analisar o seu comportamento relativamente à construção anterior. Detalhadamente, os objetivos subjacentes a este estudo são os seguintes:

- Caracterização da ameaça e revisão detalhada dos materiais de proteção utilizados;
- Desenvolvimento do modelo numérico de representação de um impacto de uma faca num sistema têxtil flexível, recorrendo ao método dos elementos finitos;
- Caracterização do comportamento mecânico do alvo e a sua influência no processo de paragem do impactor, constituído por tecido de Kevlar-29<sup>®</sup>, aquando do impacto de uma faca caracterizada pela norma NIJ-0115.00, com variação da quantidade de camadas de tecido;
- Análise dos efeitos da variação da quantidade de camadas de tecido e posição relativa entre estas;
- Estudo da implementação de cortiça no sistema têxtil flexível, na forma de micro-aglomerado, sob o ponto de vista da sua resistência à penetração da faca; e
- Avaliação da influência da configuração do alvo no processo de proteção ao impacto.

### 1.3 Guia de leitura

Esta dissertação apresenta-se fracionada em três partes, subdivididas em capítulos, perfazendo um total de oito capítulos. A Parte I diz respeito ao enquadramento do tema, revisão histórica do mesmo e caracterização dos materiais utilizados na investigação. Detalhadamente,

#### **Capítulo 1 — Motivação e objetivos**

Neste capítulo podem ler-se as motivações para a realização desta dissertação bem como os objetivos traçados para o desenvolvimento da mesma.

#### **Capítulo 2 — Ameaças e proteção pessoal**

É apresentada uma revisão histórica que contempla os diversos tipos de equipamentos de proteção utilizados pelo Homem ao longo dos momentos de conflito, bem como uma descrição geral da ameaça selecionada como foco desta investigação e a forma como ela afeta a população/forças de segurança. Pode encontrar-se ainda uma revisão bibliográfica dos trabalhos desenvolvidos pela comunidade científica nesta área de estudo e uma descrição detalhada das normas de certificação de equipamentos de proteção contra as ameaças referidas.

### **Capítulo 3 — Tecidos flexíveis e o seu papel na proteção**

O Capítulo 3 apresenta uma introdução à área temática dos tecidos, nomenclaturas, tipos de tecido e propriedades mecânicas gerais. Mais detalhadamente, o Kevlar-29<sup>®</sup> é apresentado tendo em conta a sua constituição e propriedades mecânicas e químicas. É ainda feita referência às aplicações deste material além da proteção pessoal.

### **Capítulo 4 — Materiais celulares**

Ao longo deste capítulo são introduzidos os materiais celulares, com especial enfoque na cortiça. Este material é abordado enquanto matéria-prima ao nível da sua estrutura, propriedades físicas e resposta a solicitações mecânicas. Enquanto micro-aglomerado, a forma como é utilizado neste trabalho de investigação, a cortiça é descrita ao nível do seu comportamento mecânico.

Pode encontrar-se na Parte II uma descrição detalhada dos métodos de análise e das ferramentas que foram utilizadas.

### **Capítulo 5 — Método dos elementos finitos**

O método dos elementos finitos, utilizado para descrever e avaliar o fenómeno físico em causa, é aqui descrito de forma sucinta. É ainda descrita a forma como é utilizado computacionalmente este método.

### **Capítulo 6 — Modelação numérica**

No Capítulo 6 é possível ter contacto com toda a modelação realizada ao nível geométrico para descrever o impacto, tal como todas as definições utilizadas para o caracterizar. É feita uma apresentação geral do modelo e descrito detalhadamente cada componente. Por fim, o leitor pode ainda encontrar uma breve revisão literária dos modelos que têm sido propostos no meio científico para analisar sistemas têxteis flexíveis.

A última parte deste documento apresenta os resultados, discussões e conclusões relativas à investigação no seu todo.

### **Capítulo 7 — Estudos paramétricos**

Os estudos propostos nos objetivos deste trabalho são aqui detalhados e apresentados os seus resultados. São realizados estudos ao nível da variação da quantidade de material, da adição de materiais celulares e da disposição relativa das camadas de material. Antes deste conjunto de estudos podem encontrar-se algumas análises com o sentido de definir características intrínsecas ao fenómeno e alguns pressupostos adotados no sentido de equiparar o modelo ao fenómeno físico em causa. É ainda realizada um breve discussão dos resultados obtidos.

### **Capítulo 8 — Considerações finais**

Este capítulo apresenta uma revisão das conclusões retiradas da análise realizada aos resultados presentes no Capítulo 7, tal como o traçar de uma linha de raciocínio transversal a toda a investigação.



## Capítulo 2

# Ameaças e proteção pessoal

### 2.1 Revisão histórica

As proteções pessoais têm sido usadas desde os primeiros períodos bélicos da História. Ao longo de todo este tempo, a maior parte do desenvolvimento surgiu de uma forma empírica, muito relacionado com os avanços daquilo que eram as armas utilizadas.

Os factos mais antigos que evidenciam a utilização de armaduras que protegiam a integridade dos soldados surgem através de ilustrações presentes em artefactos, textos e objetos de culto. De facto, a evidência mais antiga do uso deste tipo de proteção remonta às civilizações mais antigas da Mesopotâmia, através do Estandarte de Ur, uma representação de um cenário de batalha que data de 2600 AC. Conforme a Figura 2.1, é possível verificar a existência de soldados cobertos por mantos com inclusões de outros materiais e saias constituídas por lamelas. Este tipo de proteção foi vastamente utilizado pela civilização Assíria (2500-500 AC), que formou, muito possivelmente, o primeiro exército permanente da História, tendo adotado como comum as vestes de lamelas. Estas vestes consistiam em placas de bronze com determinada geometria, que eram ligadas umas às outras através de cordões de cabedal, constituindo uma proteção com o formato do corpo [1]. Na Figura 2.2 está representada uma das vestes de lamelas usuais na época.

Com o início do período clássico Grego (1100 AC) foi introduzido um elemento de proteção do torso feito integralmente em bronze, constituído por duas cascas metálicas com curvatura uniforme, unidas por cordões de cabedal de forma a proteger o peito e as costas dos soldados. No entanto, e devido também aos avanços introduzidos na metalurgia, começaram a desenvolver-se as mesmas proteções de torso mas com a forma dos músculos estampada na parte da frente, de maneira a proporcionar uma maior sensação de conforto, conforme a Figura 2.3, de acordo com factos datados de 800 AC [2].

A par desta inovação da civilização Grega, os Assírios introduziram, como novo elemento de proteção, armaduras de linho acolchoado. Estas estruturas, apesar de pouco eficazes na proteção contra objetos pontiagudos, apresentavam-se como bons absorvedores de energia quando sujeitos ao impacto de espadas, machados e lanças. Pela primeira vez na História, os têxteis aparecem, numa forma processada, aplicados à proteção em cenários bélicos [2]. É visível que nesta altura já se começava a fazer sentir alguma preocupação com o peso e conforto das vestes de proteção, muito provavelmente pela mudança de carácter dos exercícios militares, uma vez que as civilizações começavam a constituir exércitos permanentes ao invés de os organizarem apenas nas alturas de necessidade.

Por volta de 400 AC, com a afirmação do império Romano, surgiram novos desenvol-



Figura 2.1: Representação do Estandarte de Ur, presente no Museu Britânico [1].

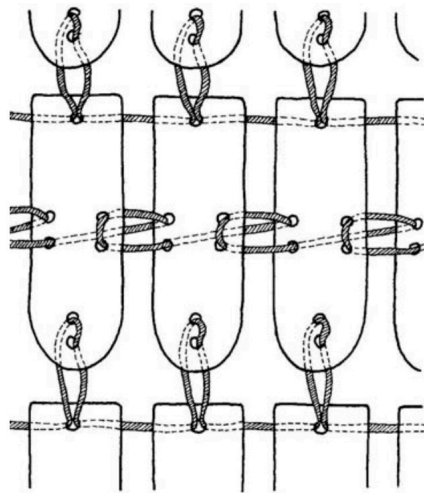


Figura 2.2: Método de junção de placas de bronze para produção de vestes de proteção [1].

vimentos em matéria de proteção corporal. Apesar do uso de elementos de proteção do torso rígidos e estampados (designados por *Lorica* por esta cultura), à semelhança do que acontecia com a civilização Grega, os soldados Romanos começavam a ostentar também uma saia de lamelas metálicas que protegia grande parte das pernas e cintura. No entanto, pela sua dificuldade de produção, as saias de lamelas e as proteções de torso rígidas foram-se tornando exclusivas dos indivíduos que desempenhavam funções de cavaleiro, normalmente atribuídas aos indivíduos mais ricos.



Figura 2.3: Proteção rígida de torso utilizada pelos soldados Gregos, c. 800 AC [3].

Neste ponto, as tropas comuns alteravam as suas vestes para um novo conceito: o *chainmail*, ou malha de ferro. Apesar de inventado pela cultura Celta, por volta de 400 AC, este método de proteção foi largamente adotado pelos Romanos e era feito de pequenos anéis metálicos, entrelaçados uns nos outros de forma a produzir um rendilhado bastante apertado sem comprometer a flexibilidade. A principal finalidade deste novo elemento de proteção era a resistência ao corte e a impactos distribuídos, uma vez que quando atingidos por objetos pontiagudos, não tinham a capacidade de distribuir a carga pelos anéis vizinhos do anel atingido, podendo este partir. Na Figura 2.4 encontra-se uma representação do padrão deste elemento de proteção, sendo que na generalidade se apresentava sob a forma de veste que cobria o torso e braços, podendo também, noutra configuração, proteger o pescoço e a cabeça.

Ainda durante o império Romano, na época do período Imperial (50 AC - 200 DC), dada a falta de conforto e flexibilidade imposta pela armadura *Lorica*, surge uma alteração a esta estrutura e que veio adicionar alguma flexibilidade às suas características de proteção. A sua constituição englobava um elevado número de peças metálicas unidas por cintas de couro e dobradiças, de modo a formar um revestimento de torso, braços e ombros como o que se mostra na Figura 2.5. Este tipo de estrutura surge assim como o culminar daquilo que são os traços evolutivos das armaduras para cenários de batalha, associando as qualidades de proteção da armadura *Lorica* e alguma da flexibilidade da estrutura *chainmail*.

Ao longo do resto do primeiro milénio e boa parte do segundo, poucos desenvolvimentos foram feitos nesta área, pelo que as vestes de proteção do tipo *chainmail*, lamelar, rígidas e compostas por material têxtil foram sendo utilizadas ao longo do tempo sem

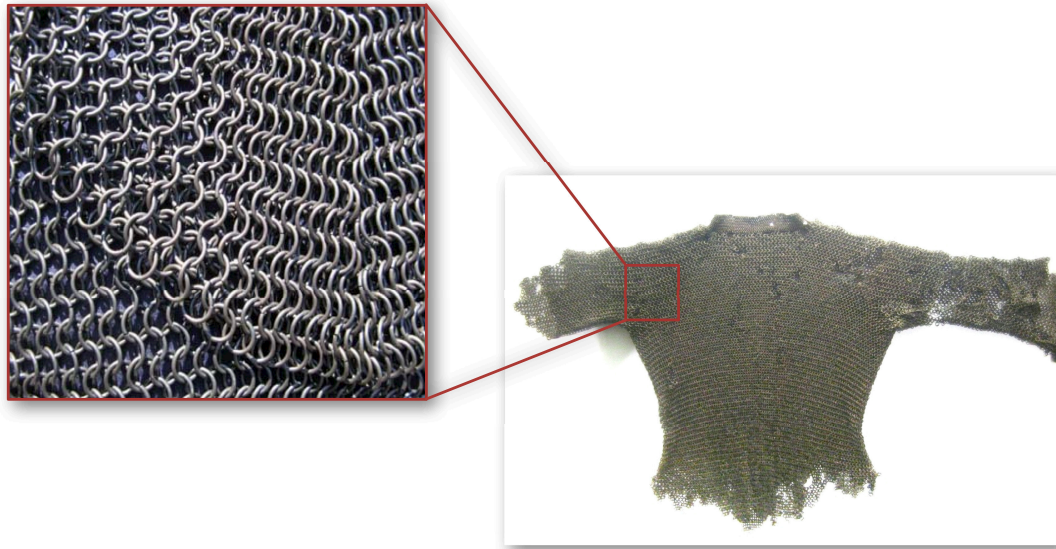


Figura 2.4: Padrão de composição das proteções do tipo *chainmail* (malha de ferro), vastamente utilizadas pela civilização Romana [4].

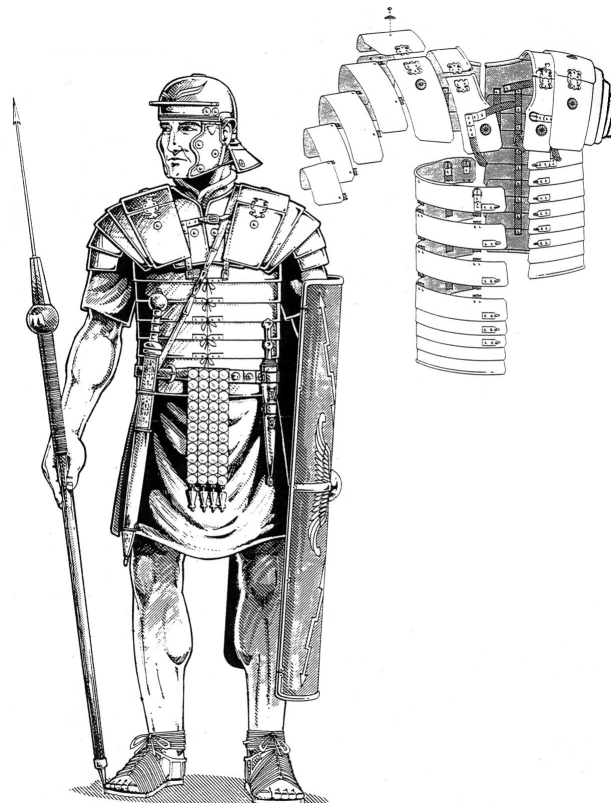


Figura 2.5: Vista explodida do equipamento de proteção *Lorica Segmentata* [5].



grandes alterações.

Com a chegada do século XVI e o aparecimento das armas de fogo, os equipamentos de proteção corporal existentes até então tornaram-se rapidamente obsoletos devido à nova magnitude das ameaças que se faziam sentir nos terrenos de batalha. O desenvolvimento de novas soluções foi feito lentamente até à altura da Primeira Guerra Mundial, onde a necessidade de proteção se impôs de forma categórica. Foram então desenvolvidas diversas formas de proteção, desde escudos a coletes acolchoados e revestidos com linho, algodão e seda. Os Alemães, entre 1917 e 1918 desenvolveram também armaduras metálicas que cobriam todo o peito. Embora eficientes, estas armaduras tinham uma massa a variar entre os 9 e 11 kg, o que comprometia extremamente a mobilidade dos utilizadores.

Com o passar do tempo e o fim da guerra, foram surgindo desenvolvimentos com a introdução de tecidos flexíveis em coletes de proteção contra armas de fogo. Estes equipamentos eram constituídos por camadas sucessivas de placas de aço e tecidos de elevada resistência, fazendo aparecer pela primeira vez a designação de “coletes à prova de bala”, como se pode observar na Figura 2.6. O seu uso estendeu-se à Segunda Guerra Mundial, mas também este equipamento atingiu um ponto de ineficiência, dados os avanços realizados na área do desenvolvimento de armas, com o aparecimento de munições de alta velocidade.



Figura 2.6: Colete de proteção pessoal utilizado pelos militares Japoneses na Segunda Guerra Mundial [6].

Desde então, diversos avanços têm sido feitos, sobretudo no campo da proteção balística, com os equipamentos de proteção pessoal a talharem dois caminhos distintos: proteções rígidas e proteções flexíveis.

No primeiro caso, os avanços têm sido feitos no sentido de substituir o aço utilizado antigamente por combinações deste com materiais cerâmicos ou plásticos, nomeadamente os materiais compósitos. Este tipo de proteções, apesar de eficiente contra várias ameaças, como é o caso de armas de fogo e penetração de objetos cortantes, têm uma grande desvantagem na sua elevada massa e na rigidez que apresentam, pelo que se tornam desconfortáveis e pouco práticos para quem os utiliza.

Neste sentido, os grandes desenvolvimentos têm seguido o caminho dos materiais têx-

teis flexíveis produzidos através de fibras de elevada resistência. Aliados a estes materiais estão também inclusões cerâmicas no sentido de aumentar a capacidade de proteção sem comprometer o conforto e a flexibilidade dos equipamentos de proteção. Na Figura 2.7 é possível observar um colete de proteção balística atual. Os desenvolvimentos nesta área têm passado pela investigação de novos tipos de fibras de elevada resistência com o intuito de melhorar os níveis de proteção atualmente padronizados por fibras como o Twaron, Technora, Spectra, DSM Dyneema, Zylon, Nylon ou Kevlar<sup>®</sup>. Outro grande ramo de desenvolvimento desta área tem vindo a ser o estudo de estruturas têxteis tri-dimensionais que façam uso da forma como são produzidas para aumentar a capacidade de proteção contra diversos tipos de ameaça.



Figura 2.7: Colete de proteção de torso flexível produzido pela empresa alemã Vicking Tactics [7].

Assim, com a grande maioria dos produtos existentes ao nível de proteção pessoal, principalmente de torso, a serem constituídos por materiais flexíveis, como os tecidos, o desenvolvimento e investigação desta matéria surgem como uma ferramenta essencial para o acompanhamento da inovação constante em questões de ameaças.

## 2.2 A ameaça

Cenários de guerra e períodos de conflito têm estado sempre presentes ao longo da História. Nestas alturas, aqueles que por eles são afetados esforçam-se por encontrar soluções para se proteger das ameaças que daí advêm. Numa perspetiva geral, as ameaças mecânicas/físicas são as mais passíveis de serem encontradas nos cenários referidos. Este tipo de ameaça inclui normalmente projéteis, facas e outros elementos pontiagudos. Apesar

da diferença de forma, estes impactores mantêm entre si uma relação de efeitos, que se expressa pela forma como causam ferimentos: a energia cinética associada ao seu movimento.

No entanto, impera a necessidade de equacionar o efeito da geometria dos impactores na efetividade de proteção dos sistemas flexíveis. Para tal, Horsfall [2] caracterizou uma série de impactores sob a forma de densidade de energia cinética, que representa a energia de impacto por unidade de área — Kinetic Energy Density (KED). Na tabela 2.1 encontram-se as comparações realizadas no seu estudo. Com base nestes dados, é evidente a elevada densidade de energia cinética de um impacto envolvendo facas relativamente ao impacto de projéteis. Isto deve-se, exclusivamente, ao facto das facas e armas com pontas afiadas terem uma área de contacto com o alvo várias ordens de grandeza mais baixa do que os projéteis, o que conduz a elevadas forças de contacto. Estas forças de contacto são tais que o sistema têxtil é forçado lateralmente a abrir e a consentir a penetração da faca.

Tabela 2.1: Classificação das armas com base na densidade de energia cinética [2].

Ameaça	Velocidade [m/s]	Energia Cinética [J]	Área [mm <sup>2</sup> ]	KED [J/mm <sup>2</sup> ]
Faca	10	43	2.5 (romba) 0.2 (pontiaguda)	17 215
Projétil 0.357	450	1032	254	4
Projétil de espingarda AK47	720	2050	45	45
Projétil de alta-velocidade SA80	940	1805	24	75

Na sua génese, o problema do impacto de facas em sistemas têxteis parte da dificuldade de dissipação de energia, precisamente pela reduzida área de contacto entre a faca e o tecido. Segundo um estudo levado a cabo por Chadwick [8], um membro da população masculina consegue produzir um impacto com uma faca com uma energia média de cerca de 36 J, o que resulta num KED maior que qualquer projétil de alta velocidade.

Estatisticamente, a ofensa corporal com recurso a facas ou navalhas representa uma forte preocupação ao nível social. Nos Estados Unidos da América, no ano de 2011, 13.4% dos 12664 homicídios foram cometidos utilizando este tipo de arma [9]. Já no Reino Unido, nos primeiros 6 meses de 2012 foram registados 29613 incidentes com utilização de armas brancas, 7% do total das ofensas registadas. Este valor sobe quando se analisam os homicídios, que no biénio 2011/12 somaram 200 casos com recurso a facas, 39% do total de homicídios [10]. Assim, facilmente se percebe que este tipo de arma constitui um grave perigo social, que atinge dimensões grotescas quando se fala em crimes maiores, como ofensas graves e homicídios.

Por isto, dada a relevância que os crimes cometidos com recurso a armas brancas assumem num contexto social, é de extrema importância estudar o comportamento de sistemas têxteis flexíveis de forma a perceber quais as limitações específicas que estes oferecem na resistência a impactos de facas e outros objetos que representem ameaças de tipo semelhante.

## 2.3 Revisão bibliográfica

Os estudos do desempenho de sistemas têxteis flexíveis sob o efeito de impactos mecânicos têm-se concentrado na variação dos aspetos físicos relacionados com o impacto em si e não tanto com a procura de novas fibras de alta-resistência.

Na literatura é possível verificar que esta procura pelo conhecimento do comportamento dos têxteis tem revelado a separação de métodos em 3 vertentes distintas: (i) a previsão analítica, (ii) a simulação numérica e (iii) a componente experimental. Mais evidente ainda é o vasto portfólio literário no que toca a impactos balísticos e a escassa relevância dada a impactos com facas e objetos com baixa velocidade.

De forma claramente simplificada e na sua maioria recorrendo a métodos que fazem uso das leis da conservação da energia e da quantidade de movimento, vários modelos analíticos que preveem o comportamento de um sistema têxtil flexível sob um impacto balístico têm sido apresentados. Exemplo disto é o trabalho desenvolvido por Chen *et al.* [11], que visa a apresentação de um modelo analítico que determina a velocidade residual de um projétil após a perfuração de um tecido composto por várias camadas de Kevlar<sup>®</sup>. Outro estudo idêntico foi levado a cabo por Gu [12], que propôs também um modelo analítico para a previsão da redução de energia cinética de um projétil de acordo com a perfuração de cada camada de um tecido multi-camada de Twaron<sup>®</sup> e Kuralon<sup>®</sup>. Ainda no mesmo âmbito e no sentido de comparar o limite balístico do seu modelo com resultados numéricos, Bresciani [13] concluiu que o seu modelo analítico apresentava resultados em gamas inferiores aos obtidos através de simulação numérica. Estudos realizados por Hetherington [14], Walker [15], Porwal *et al.* [16] e Naik *et al.* [17] conduziram também a modelos analíticos com o propósito de determinar o comportamento de sistemas têxteis flexíveis sob impacto balístico, no que diz respeito à rotura das fibras e à dissipação da energia do projétil.

Da mesma forma, o estudo numérico do mesmo fenómeno físico encontra-se vastamente detalhado na literatura. Os trabalhos desenvolvidos neste âmbito são realizados, na sua maioria, com recurso a *software* que recorre ao método dos elementos finitos como base para os cálculos realizados, sendo que a grande maioria recorre à utilização do programa comercial LS-DYNA<sup>™</sup>. Neste sentido, Cheeseman *et al.* [18] estudaram a influência de diversos parâmetros na resposta de um tecido ao impacto de um projétil, nomeadamente as propriedades do material do tecido, a velocidade do impacto, a geometria do projétil e o número de camadas, concluindo que esses são parâmetros com relativa influência no comportamento do têxtil. Por outro lado, o estudo da influência das condições de fronteira, da estrutura do tecido e do atrito entre os pares impactor-tecido e tecido-tecido não revela variações significativas no comportamento geral do sistema.

Duan *et al.* [19] dedicaram-se ao estudo específico da influência do atrito num impacto balístico contra uma estrutura flexível de tecido de proteção de alta resistência. As condições de fronteira (tecido preso pelos vértices, duas margens encastradas e as quatro margens encastradas, respetivamente) e o coeficiente de atrito entre os *yarns*<sup>1</sup> do tecido foram alteradas por forma a avaliar a sua influência na absorção da energia do impacto. Os autores verificaram que, como esperado, o aumento do coeficiente de atrito aumenta a absorção de energia, e que esta aumenta com o perímetro de tecido encastrado.

---

<sup>1</sup>Daqui em diante, a expressão *yarn* será sempre escrita em inglês devido à não-existência de tradução direta para português.

No sentido de propor uma formulação do modelo de material para descrever o tecido ao nível mesoscópico, em que cada conjunto de fibras atua como um corpo independente, Sha *et al.* [20] publicaram um estudo onde, através da análise numérica de um tecido de Kevlar<sup>®</sup>, procederam à inclusão do fenómeno de recuperação elástica no sentido de descrever corretamente a natureza viscoelástica do tecido, sendo que os resultados foram bastante coerentes com resultados experimentais.

Rao *et al.* [21] avaliaram o tempo computacional no que toca à completa ou parcial representação do tecido segundo um padrão ondulado. Foi realizada uma gama de simulações numéricas em que o domínio do tecido foi inteiramente representado e outra gama em que apenas foram representadas com padrão ondulado duas faixas perpendiculares entre si, que se encontram no centro do domínio de estudo. Como grande vantagem deste segundo modelo foram apresentados os ganhos em tempo de cálculo que, dependendo da arquitetura da máquina onde foram processadas as simulações, podem chegar aos 82%.

No sentido de avaliar também a influência de fatores externos ao sistema flexível, existem estudos que centram as suas atenções na variação da geometria dos projéteis. Exemplo disto são os trabalhos apresentados por Lim *et al.* [22], Tan *et al.* [23] e, em particular, por Talebi *et al.* [24]. Neste último, a investigação centrou-se na avaliação de um modelo numérico de tecido de Twaron<sup>®</sup> (modelado ao nível do entrelaçamento) aquando da variação do ângulo da ponta do projétil, que varia entre os 30° e os 180° em intervalos de 15°, no que toca à absorção de energia, tamanho do furo provocado no tecido e distribuição de tensões de von Mises. No geral, como principal conclusão figurou o facto do projétil com ponta de 60° ser o que mais dano provoca no tecido.

No entanto, e como já referido, a literatura encontra-se carente no que toca ao estudo do comportamento de tecidos de proteção contra o impacto de objetos como facas e outros elementos cortantes. Nesta linha, apenas dois estudos apresentam características de impacto como as agora referidas. Um deles, apresentado por Wang *et al.* [25], tem como principal mote um melhor entendimento do mecanismo da facada e da rotura das fibras. O modelo foca-se essencialmente no estudo da deformação individual dos *yarns* e do efeito das propriedades do material na resistência à facada. O comportamento do tecido foi avaliado tendo em conta a distribuição de tensões na direção transversal e longitudinal ao mesmo. Através deste estudo, é possível concluir que o tecido apresenta um comportamento mecânico complexo e não-linear quando sujeito a um impacto com um objeto deste tipo.

Por sua vez, Wang *et al.* [26] publicaram também um estudo onde a penetração de uma faca através de um tecido de proteção é avaliada. Aqui, os resultados apresentados mostram que a força resistente à penetração da faca no tecido reduz-se para um valor insignificante após a rotura ou deslocamento das fibras que experimentam o primeiro contacto com a faca.

O estudo de tecidos simples sob o impacto de facas e outros objetos cortantes encontram-se ainda numa fase bastante prematura ao nível da investigação científica. Esta dissertação prende-se, portanto, com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento da investigação neste campo.

## 2.4 Testes normalizados

Na sequência da necessidade de padronizar os requisitos mínimos dos equipamentos de proteção quando sujeitos a impactos de armas cortantes ou objetos pontiagudos, como facas ou espigões, foram desenvolvidas diversas metodologias de teste às quais aqueles equipamentos se submetem no sentido de se certificarem. Esta uniformização torna-se particularmente útil quando as forças militares e elementos de equipas de segurança necessitam de adquirir proteções pessoais contra este tipo de ameaça, no sentido em que podem ajustar a sua aquisição face à realidade das suas necessidades.

Por outro lado, as normas existentes constituem também um ponto de referência para os fabricantes de sistemas de proteção, uma vez que lhes permite otimizar os produtos de acordo com a gravidade da ameaça contra a qual pretendem que o equipamento de proteção seja eficaz.

Neste sentido, as duas principais normas que regulam este tipo de equipamentos são as produzidas pelos Estados Unidos e pelo Reino Unido relativas a esta matéria, nomeadamente pelo *US National Institute of Justice* (NIJ) e pelo *UK Home Office Scientific Development Branch* (HOSDB). Existe ainda um conjunto reduzido de outras metodologias de teste. Porém, a sua utilização é bastante reduzida faces às duas normas referidas.

Nos pontos seguintes é detalhada a metodologia a que cada norma submete os sistemas de proteção bem como os requisitos a cumprir para certificarem os equipamentos com o nível de proteção correspondente.

### 2.4.1 NIJ 0115.00 — *Stab resistance standard for personal body armour*

Excluindo completamente a proteção balística, esta norma prende-se única e exclusivamente com a certificação de equipamentos de proteção sujeitos a ameaças do tipo facada.

A norma NIJ-0115.00 tem a sua metodologia de testes dividida em duas classes. Uma das classes regula a proteção contra as designadas “armas de rua”, que incluem facas e objetos cortantes na sua generalidade, enquanto que a outra classe aborda armas geralmente adaptadas de ferramentas ou outros materiais, como é o caso dos espigões, em que normalmente a sua utilização está associada a ambientes como prisões e estabelecimentos de correção. A primeira é denominada por *Edge Blade Class* enquanto que a segunda é referida como *Spike Class*.

Cada uma das classes referidas encontra-se ainda dividida em três níveis de proteção, definidos de acordo com a energia de impacto a que o equipamento em teste está sujeito. No entanto, e no sentido de garantir uma margem de segurança, a cada um destes níveis de proteção correspondem dois tipos de teste. O primeiro em que a energia de impacto é baseada na energia média despendida num ataque do tipo facada por uma população masculina (percentil 85, 90 e 96, de acordo com os níveis de energia 1, 2 e 3, respetivamente), designado por *E1*. O segundo, *overtest*, com um aumento de 50% do valor de energia face ao primeiro teste, denominado *E2*. Na Tabela 2.2 é apresentado um resumo dos níveis de proteção e da energia de impacto associada a cada um.

A metodologia de certificação dos equipamentos de proteção sujeitos a esta norma passa por uma combinação de impactos que engloba as energias correspondentes a cada nível de proteção e as duas classes de armas. Assim, realiza-se um conjunto de ensaios com armas diferentes e em ângulos de impacto distintos, dentro do nível de proteção

Tabela 2.2: Níveis de energia associados a cada nível de proteção contra facada segundo a norma NIJ-0115.00 [27].

Nível de proteção	Teste $E1$ [J]	<i>Overtest</i> $E2$ [J]
1	$24 \pm 0.50$	$36 \pm 0.60$
2	$33 \pm 0.60$	$50 \pm 0.50$
3	$43 \pm 0.60$	$65 \pm 0.80$

especificado.

Face à metodologia descrita, os sistemas de proteção em prova são certificados se tiverem resistido (ou consentido) uma penetração máxima de 7 ou 20 mm, para os ensaios normais ou *overtest*, respetivamente.

Assim, e sabendo que a certificação dos equipamentos é feita através da análise de penetração do impactor no alvo, torna-se indispensável uma boa e inequívoca caracterização deste último. Em consequência disto, a norma NIJ-0115.00 descreve o alvo como o conjunto do sistema de proteção sujeito a testes e uma conjugação de materiais de suporte que têm como principal função representar a rigidez e dinâmica própria do torso humano quando sujeito a um impacto. Os materiais de suporte são espuma de neoprene, espuma de polietileno e borracha. Na Figura 2.8 representa-se a geometria e disposição relativa dos constituintes do alvo.

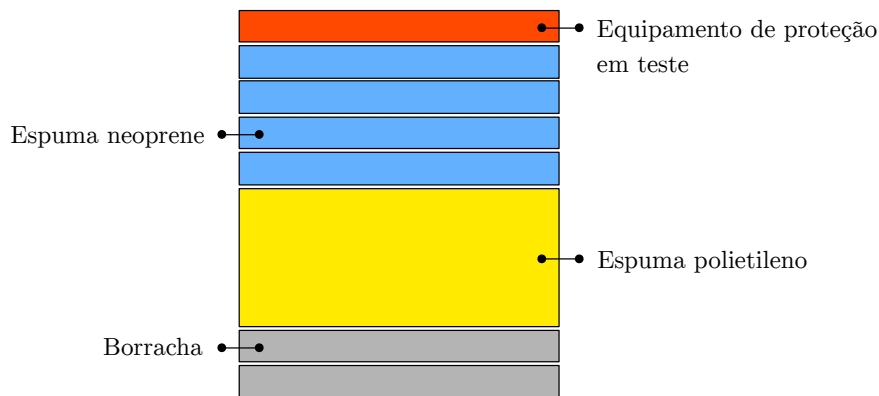


Figura 2.8: Geometria e posição dos constituintes do alvo referido na norma NIJ-0115.00 (adaptado de [27]).

Para a realização dos testes de impacto propostos pela metodologia apresentada por esta norma, são utilizados dois tipos específicos de facas e um espigão. Uma das facas, designada por PSDB/P1/A é utilizada no sentido de representar as armas frequentemente designadas por “armas de rua”, enquanto que a outra, denominada por PSDB/S1/G, apresenta uma configuração mais estreita e dois gumes cortantes, ao invés da PSDB/P1/A que apresenta apenas um gume cortante. O espigão apresenta uma secção circular e é referido apenas como *Spike (Long)* [27]. Nas Figuras 2.9 a 2.11 encontram-se representados os desenhos técnicos dos impactores mencionados.

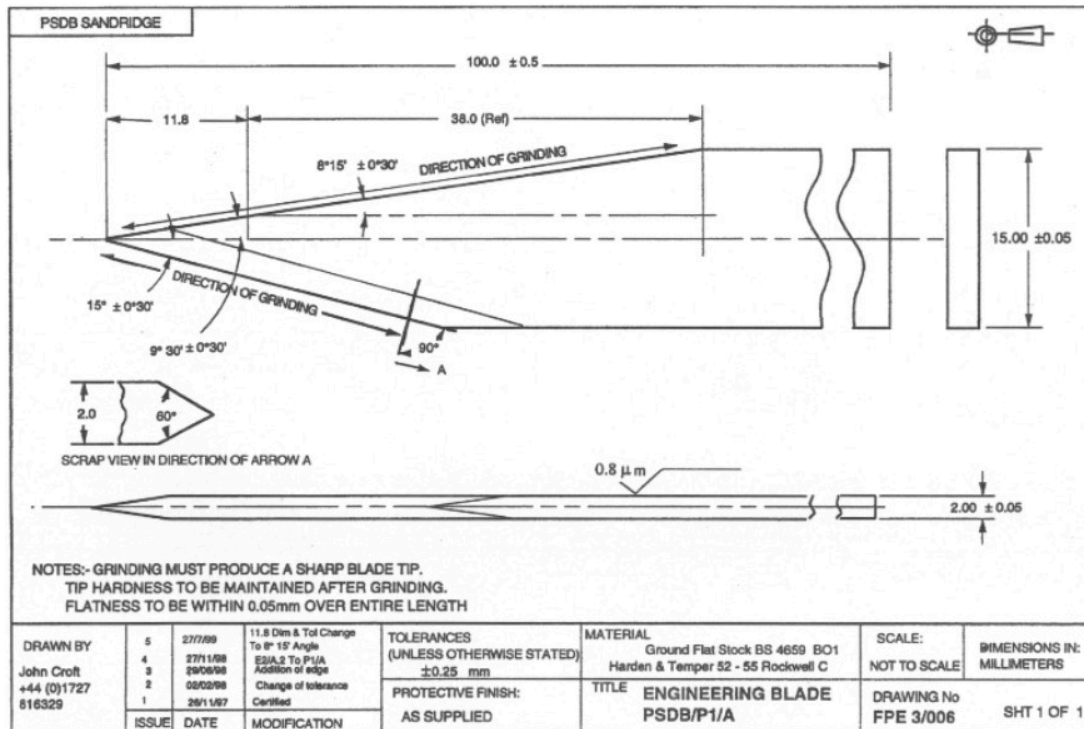


Figura 2.9: Desenho técnico da faca PSDB/P1/A [27].

#### 2.4.2 HOSDB — *Knife and spike resistance*

Tal como a norma NIJ-0115.00, a norma desenvolvida pelo programa de proteção da polícia do Reino Unido que regula e certifica os equipamentos de proteção contra facada e armas pontiagudas, centra-se no teste destes equipamentos sob influência do impacto de facas e espigões, realizados em torres de queda em ambientes controlados. Os impactos realizados com esta metodologia são causados pelo efeito da gravidade uma vez que o impactor e a massa a que está acoplado são soltos do topo da torre de queda.

Desde a sua primeira versão em 1993 (na altura designada por PSDB), que têm sido usados diversos tipos de facas como impactor. Inicialmente esta norma utilizava facas comerciais, representadas na Figura 2.12, mas rapidamente foram substituídas por novos tipos de faca por forma a qualquer fabricante ter acesso ao mesmo tipo de impactor, sendo os desenhos técnicos destes publicados na própria norma. Ao longo das revisões do documento (em 1999, 2003 e 2007) foram alterados pequenos aspetos, nomeadamente o material de suporte do equipamento de proteção em teste e a forma como o impacto é desencadeado.

Atualmente, a norma HOSDB apresenta características e metodologias semelhantes à norma NIJ-0115.00, com exceção dos níveis de proteção e da sequência de impactos a que os exemplos em teste são sujeitos. No que diz respeito aos impactores, o documento atual utiliza apenas dois tipos: uma faca e um espigão. A faca é denominada por PSDB/P1/B e o espigão é referido como PSDB/SP/B, embora sejam iguais aos da norma NIJ-0115.00, quer na forma quer no material de que são feitos.

Quanto aos níveis de proteção, as diferenças encontradas face à norma anteriormente



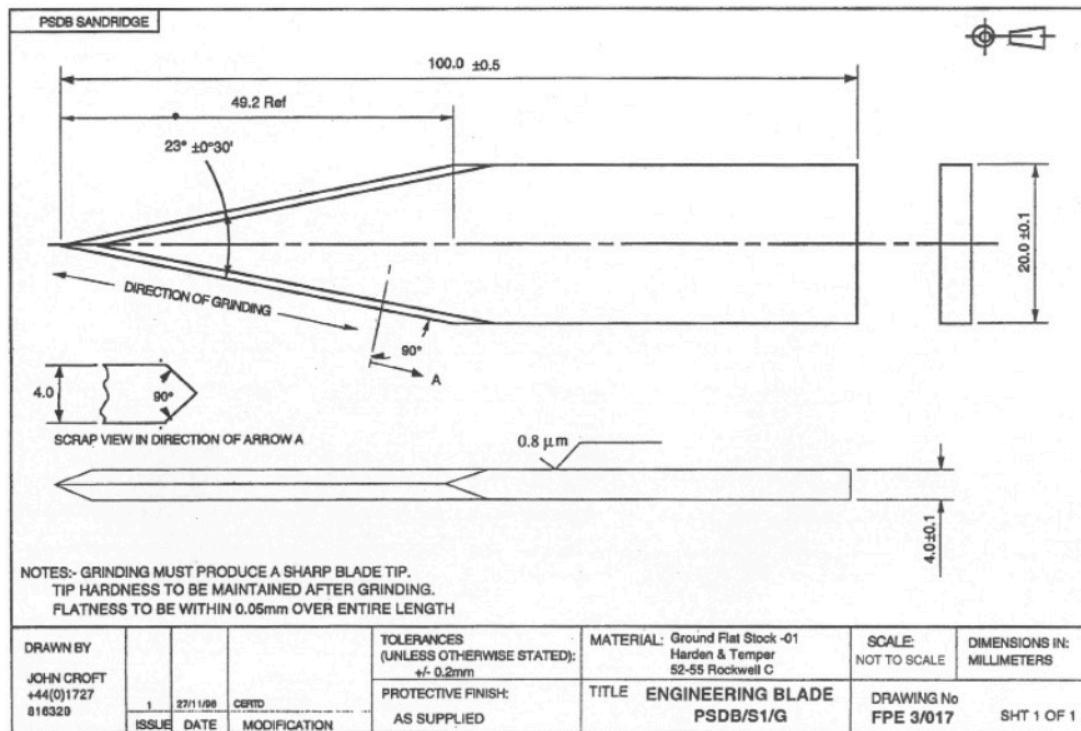


Figura 2.10: Desenho técnico da faca PSDB/S1/G [27].

referida não se restringem à designação mas abrangem também a metodologia adotada para os impactos. Aqui, a sequência de impactos é uma combinação dos níveis de energia  $E1$  e  $E2$  presentes na norma NIJ-0115.00 num total de 40 repetições (em equipamentos de teste diferentes), sendo que existem seis níveis de proteção: três com resistência ao impacto de facas (designados por KR — *knife resistance*) e três com resistência ao impacto de facas e espigões (designados por KR+SP — *knife resistance + spike resistance*). Nestes últimos, a sequência de testes ao impacto de espigões tem em conta 10 repetições. Na Tabela 2.3 encontram-se resumidos os níveis de proteção certificados pela norma [29, 30].

Tabela 2.3: Resumo dos níveis de energia associados a cada nível de proteção contra facada presentes na norma HOSDB [30].

Nível de proteção	Teste $E1$ [J]	Penetração máxima $E1$ [mm]	Overtest $E2^2$ [J]	Penetração máxima $E2^2$ [mm]
KR1	24	7	36	20
KR1+SP1	24	KR1=7, SP1=0	KR1=36	KR1=20
KR2	33	7	50	20
KR2+SP2	33	KR2=7, SP2=0	KR2=50	KR2=20
KR3	43	7	65	20
KR3+SP3	43	KR3=7, SP3=0	KR3=65	KR3=20

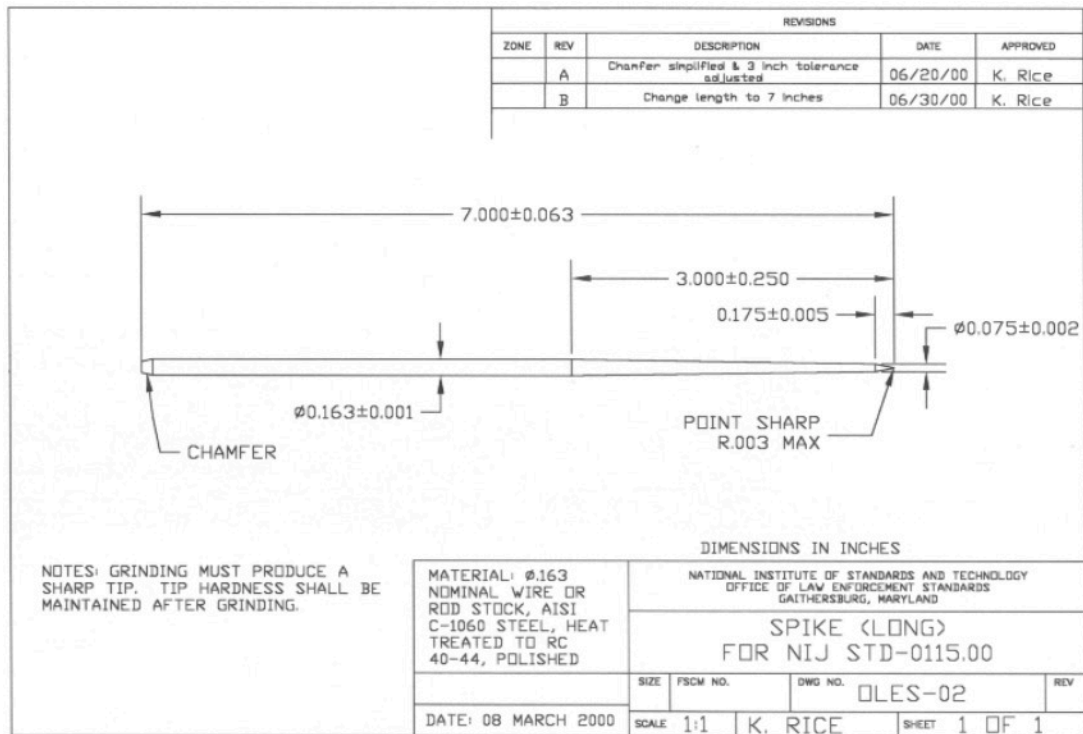


Figura 2.11: Desenho técnico do espigão *Spike (Long)* [27].



Figura 2.12: Impactores utilizados pela HOSDB (versão 1, 1993) [28].

### 2.4.3 Corpo de polícia Suíça e Alemã — Testes de resistência contra facada

Criadas conjuntamente pelos corpos de polícia da Suíça e Alemanha, estas duas normas apresentam diferenças mínimas nos seus procedimentos e regulamentos. A faca utilizada como impactor tem dois gumes e provoca um impacto com uma energia de 35 J, provocado pela massa acoplada à faca, que tem uma massa de 2.6 kg. O alvo consiste num bloco de Plastolina<sup>®</sup> como suporte ao sistema em teste e a certificação do mesmo é definida por um limite de 20 mm de penetração do alvo.

<sup>2</sup>Testes de impacto com espigão não aplicáveis ao nível de energia *E2*.

---

Menos utilizadas que as duas normas anteriormente detalhadas, estas certificações de equipamentos de proteção contra facada tem o seu uso apenas para fins internos dos corpos de segurança Suíço e Alemão [1].



## Capítulo 3

# Tecidos flexíveis e o seu papel na proteção

### 3.1 Os tecidos flexíveis

Os tecidos flexíveis são produzidos maioritariamente para três funções distintas: decoração, vestuário e aplicações técnicas. No que a estas últimas diz respeito, os tecidos estão entre os materiais mais usados na indústria moderna, muito devido à combinação única de propriedades tais como: baixa densidade, flexibilidade e resistência [31]. O seu interesse é transversal às indústrias automóvel, aeroespacial, construções navais, vestuário e proteção pessoal e de estruturas.

A maioria dos tecidos são produzidos com recurso à tecelagem realizada em teares ou em equipamentos com o mesmo princípio de funcionamento [32].

#### 3.1.1 Constituição dos tecidos

A aparência dos tecidos como produto acabado esconde frequentemente a sua verdadeira constituição ao nível micro e mesoscópico. Ao nível microscópico, os tecidos são constituídos por fibras contínuas de um determinado material que, quando agrupadas, formam uma estrutura denominada por *yarn*<sup>1</sup>, conforme esquematizado na Figura 3.1.

Na globalidade, os tecidos mais comuns são constituídos por 2 séries de *yarns* entrelaçados entre si e a perfazerem ângulos retos nas zonas de sobreposição. A série que se apresenta ao longo do comprimento do tecido, isto é, os *yarns* que estão presos ao tear na altura do fabrico, são conhecidos como *warp ends*, enquanto que os *yarns* perpendiculares a estes e que percorrem a largura do tecido, são denominados *weft picks*, como se exemplifica na Figura 3.2.

Para a representação dos vários tipos de tecido, é recorrente a utilização de células representativas unitárias (CRU). Estas estruturas elementares são a forma mais básica do tecido que permite a repetibilidade e a consequente representação da globalidade do mesmo. Na grande maioria dos casos, a utilização de dois *yarns* de cada série (*warp ends* e *weft picks*) é suficiente para garantir esta repetibilidade.

Em boa verdade, qualquer CRU é composta por inúmeras fibras e não apenas pelos

---

<sup>1</sup>Daqui em diante, as expressões *yarn*, *warp ends*, *weft picks*, *plain weave*, *satin weave* e *twill weave* serão sempre escritas em inglês devido à não-existência de tradução direta para português.

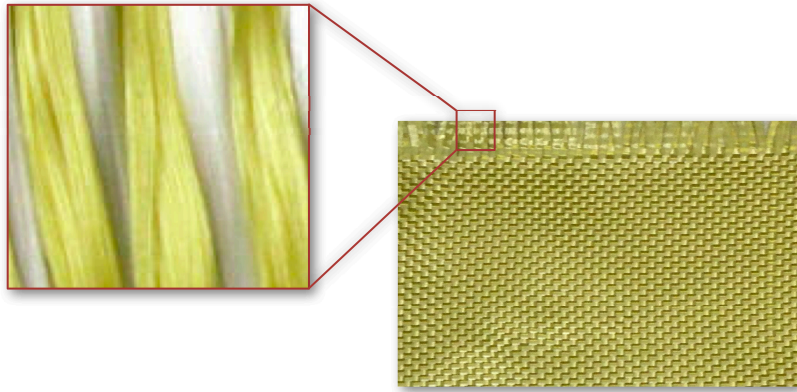


Figura 3.1: Constituição dos tecidos (adptado de [33]).

seus *yarns*. No entanto, a maior parte dos autores opta por uma abordagem simplificada e representa cada *yarn* como um volume sólido [34]. Diversas razões justificam esta aproximação. Contudo, aquela que mais relevância tem é a sua extrema utilidade para análises computacionais aos tecidos, não apenas no que toca à velocidade do processador, mas também pelas inerentes limitações de memória.

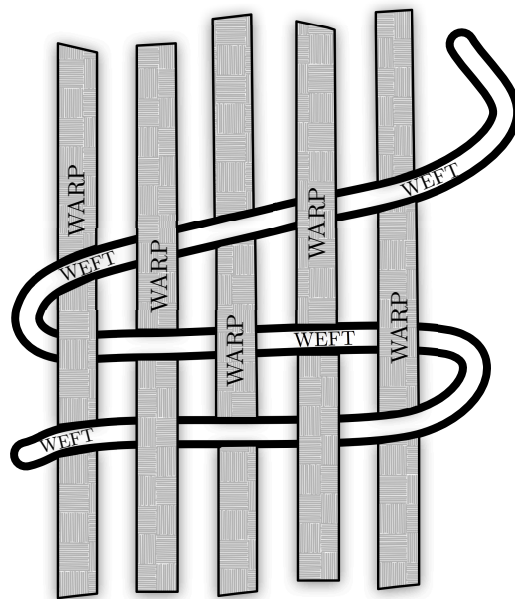


Figura 3.2: Orientação e nomenclatura dos *yarns* (adaptado de [35]).

### 3.1.2 Composições elementares

Quando se fala de tecidos, é importante referir que existe um grande número de células representativas unitárias com estruturas e geometrias diferentes, que definem, entre outros aspetos, o padrão dos tecidos.

Uma grande parte dos tecidos que têm como objetivo aplicações técnicas têm uma confecção bidimensional. O tecido, constituído por uma única camada de *yarns* entrelaçados, pode ser produzido com um número praticamente ilimitado de padrões, conseguidos através da variação do número de *yarns* da série longitudinal (*warp ends*) que passa por cima e por baixo da série transversal (*weft picks*). Os padrões mais conhecidos são o *plain weave*, o *twill weave* e o *satin weave*, conforme representados na Figura 3.3 [36]. Quanto aos tecidos do tipo *plain weave*, estes possuem uma estrutura simples em que os *weft picks* passam alternadamente por cima e por baixo dos *warp ends*, enquanto que as estruturas *twill weave* são caracterizadas por dois ou mais *yarns* transversais a cruzarem os longitudinais, seguindo uma progressão, de forma a criarem uma diagonal visualmente distinguível. Por fim, nas estruturas *satin weave* cada *weft pick* cruza pelo menos três *warp ends* e entrelaça no quarto, também com uma progressão da esquerda para a direita. Estas estruturas são geralmente anisotrópicas e com pouca resistência ao corte no plano do tecido [37].

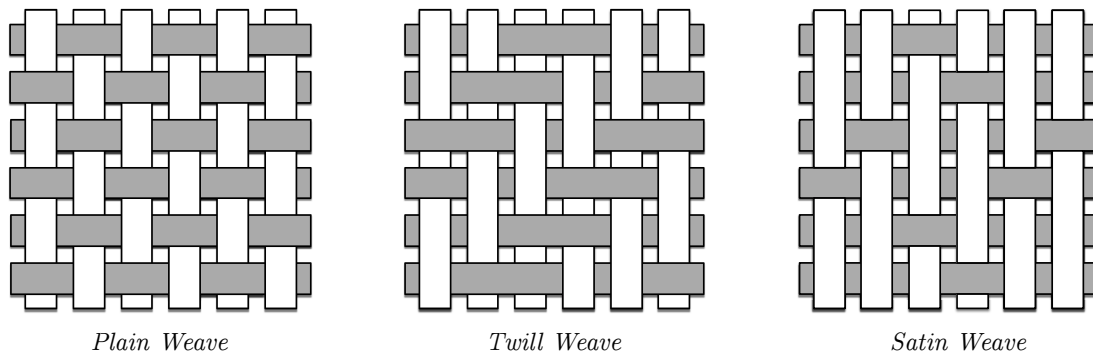


Figura 3.3: Diferentes geometrias de tecidos 2D.

Apesar da grande maioria dos tecidos apresentar uma configuração bidimensional (2D), têm vindo a crescer o número de estruturas que apresentam uma configuração tridimensional (3D) [32]. Os tecidos com estruturas tridimensionais distinguem-se dos bidimensionais por possuírem um tipo adicional de *yarn*, denominado *binder yarn*, que efetua a ligação entre as várias camadas do tecido num plano perpendicular a estas e também pelo facto de a espessura ser considerável relativamente às outras duas dimensões da CRU.

Os tecidos 3D podem ser obtidos por um processo de tecelagem múltipla, que concebe diretamente as várias camadas, ou através do processo convencional, dependendo da geometria pretendida. As três geometrias mais utilizadas no fabrico de tecidos tridimensionais são do tipo *layer-to-layer*, *angle interlock* e ortogonal, todas elas representadas na Figura 3.4. Destes casos, apenas a última geometria necessita obrigatoriamente de um equipamento de tecelagem tridimensional.

No que toca às características intrínsecas à sua conceção, a arquitetura *multilayer* consiste na adição de múltiplas camadas de tecido 2D, em que cada camada tem as suas próprias séries de *warp ends* e *weft picks*. A ligação entre as camadas é feita por auto-costura por alguns dos *yarns* existentes. Por outro lado, nas células unitárias do tipo *angle interlock*, os *warp ends* deslocam-se na diagonal desde uma superfície até à outra, juntando todas as camadas. Já a geometria ortogonal consiste em três conjuntos

de *yarns* perpendiculares entre si. Neste tipo de formação em particular, as *binder yarns* interligam as outras duas séries de *yarns*, consolidando a CRU [38].

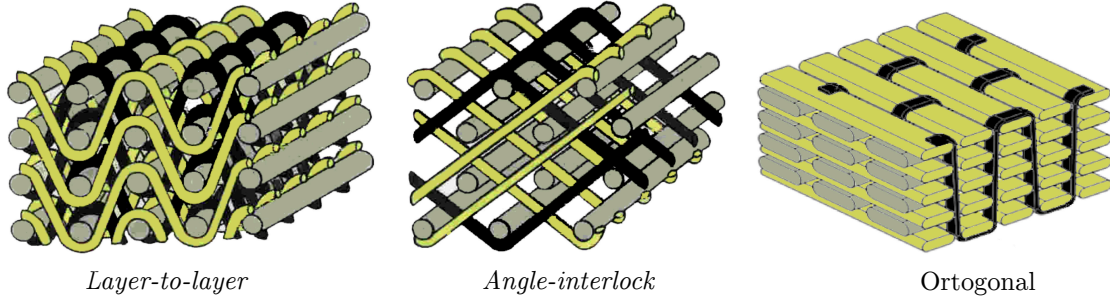


Figura 3.4: Diferentes geometrias de tecidos tridimensionais (3D) [39].

### 3.1.3 Morfologia e estrutura tridimensional

As propriedades mecânicas de um tecido dependem essencialmente da sua estrutura, o que torna a sua representação indispensável. Para a sua total descrição é necessário, como referido anteriormente, uma representação prévia da célula representativa unitária e, portanto, é de todo o interesse o estudo matemático da sua geometria.

Neste documento serão abordados apenas os tecidos com maior grau de repetibilidade, o que implica também as células representativas unitárias mais pequenas, sendo assim analisada a estrutura do tipo *plain weave*. Neste sentido, existem duas abordagens possíveis para representar os tecidos, que serão detalhados nos pontos seguintes.

#### Abordagens bidimensionais para representação de tecidos

Um dos primeiros estudos realizados para a representação da estrutura dos tecidos, nomeadamente o *plain weave*, foi apresentado por Pierce em 1937 [40] e propõe uma abordagem com base em parâmetros geométricos para a representação completa de uma CRU, através de uma secção bidimensional da mesma. Este modelo elementar apresenta uma secção circular e baseia-se no pressuposto de que o tecido é incompressível. Na realidade, dados estes pressupostos e considerando as condições em que o modelo foi baseado, o seu uso torna-se bastante limitado, uma vez que a secção perfeitamente circular aliada à incompressibilidade são aspetos completamente irrealistas.

No entanto, com este seu modelo, Pierce provou que o somatório dos diâmetros das duas séries de *yarns* é igual ao somatório da distância do centro de cada série ao centro da secção transversal do tecido, conforme representado pela equação

$$d_1 + d_2 = h_1 + h_2 \quad (3.1)$$

e pela Figura 3.5a. De forma a colmatar algumas das falhas do primeiro modelo, Pierce apresentou mais tarde um modelo de representação de uma célula unitária com recurso à substituição das secções circulares por secções elípticas. Esta nova estrutura é bastante mais realista no que toca à representação de tecidos. No entanto, continua a ter alguns problemas dada a incapacidade para representar tecidos fechados, isto é, tecidos com



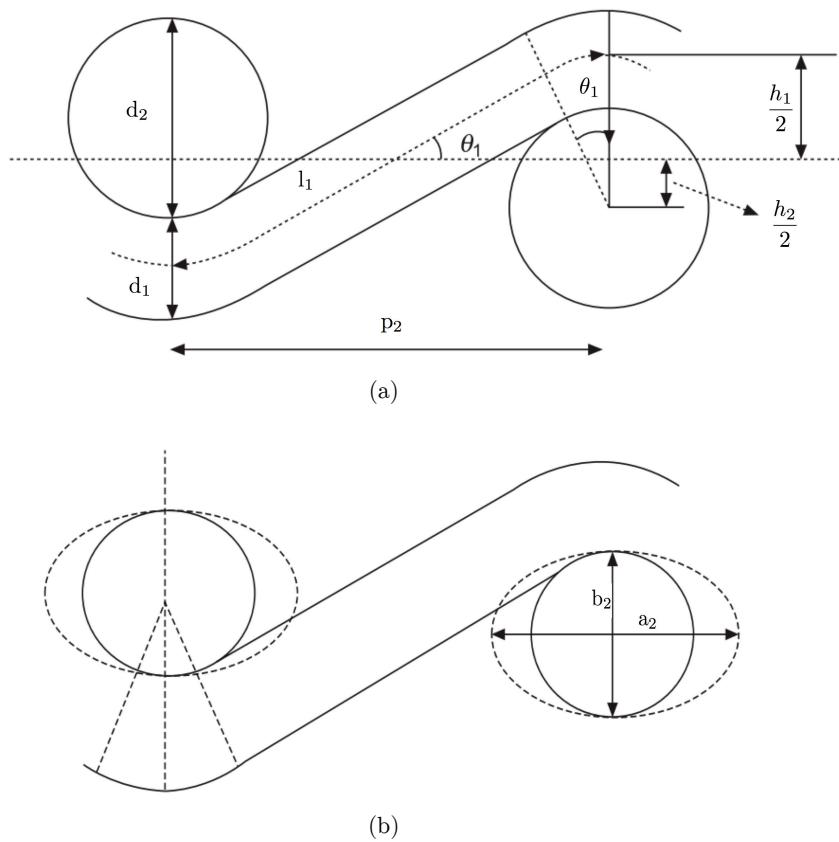


Figura 3.5: Modelo geométrico de Pierce com (a) secção do *yarn* circular e (b) secção do *yarn* elíptica [41].

pouco ou nenhum espaço entre as duas séries de *yarns*. Este modelo está retratado na Figura 3.5b.

Posteriormente, diversos autores apresentaram estudos para uma representação mais abrangente. Caso disso foi a proposta de Kemp em 1958 [42], onde descrevia os *yarns* como tendo uma secção semelhante a um retângulo com os cantos arredondados, designada por *power-ellipse* ou *racetrack*. Esta representação induz assim um passo considerável na total descrição de qualquer tecido do tipo *plain weave*. Na figura 3.6 é possível visualizar um exemplo deste modelo.

Uma outra geometria ainda bastante utilizada nos dias de hoje para descrever os *yarns* é a forma lenticular. Este modelo, proposto por Hearle e Shanahan em 1978 [43], assume a forma de uma elipse com a sua dimensão maior a terminar de forma pontiaguda, como se pode observar na Figura 3.7 [41].

Desde então, as metodologias de base aqui apresentadas têm vindo a ser desenvolvidas no sentido de avaliar e descrever a estrutura dos tecidos, principalmente ao nível das abordagens tridimensionais e não puramente geométricas, recorrendo a ferramentas algébricas. Caso disto é a metodologia apresentado por Sherburn [34], que será detalhada a seguir.

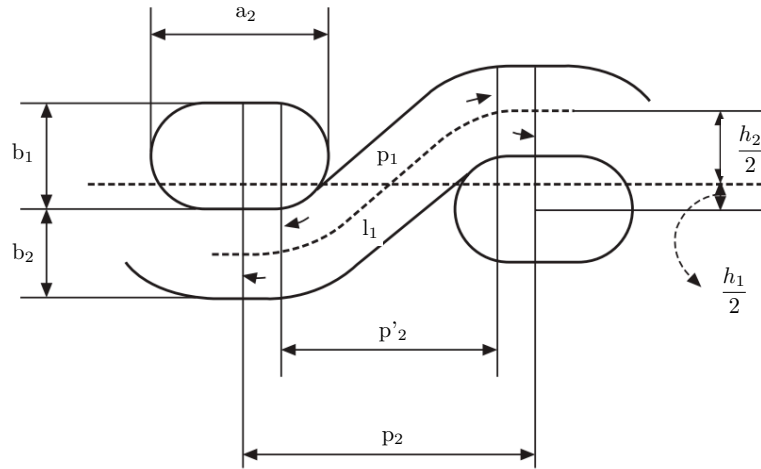


Figura 3.6: Modelo geométrico de Kemp com secção do *yarn racetrack* [41].

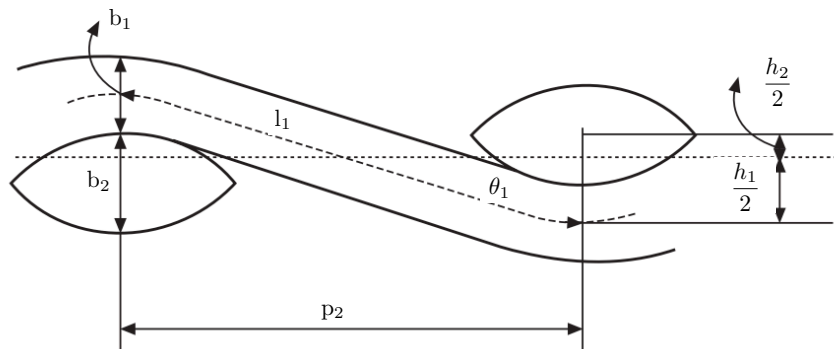


Figura 3.7: Modelo geométrico de Hearle com secção do *yarn lenticular* [41].

### Representação tridimensional de tecidos

Usando uma metodologia tridimensional para representar convenientemente a estrutura de um tecido, como é o caso da abordagem realizada por Sherburn [34], é necessário definir (i) o trajeto do *yarn* ao longo da célula representativa e (ii) a forma geométrica da secção do mesmo, no sentido de recriar a superfície fechada que lhe dá origem.

O trajeto de cada *yarn* pode ser representado através de uma linha curva situada no centro geométrico da secção do *yarn*, o que, dada a condição de repetibilidade da estrutura *plain weave*, apenas se impõe como necessária a representação do comprimento mínimo que garanta a sua repetibilidade.

A forma mais simples de definir o trajeto ondulado do *yarn* passa pela colocação de pontos no centro geométrico e ao longo do seu comprimento e realizar uma interpolação com recurso a funções de continuidade  $C^1$ , de modo a que as tangentes nos pontos de repetibilidade tenham a mesma direção e amplitude. Como solução para esta interpolação torna-se indicado o uso de curvas do tipo *spline*. Na sua forma genérica, uma *spline*  $\mathbf{S} : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  consiste em partes polinomiais  $\mathbf{S}_i : [t_i, t_{i+1}] \rightarrow \mathbb{R}$ , onde

$$a = t_0 < t_1 < \dots < t_{k-2} < t_{k-1} = b \quad (3.2)$$

e assim,

$$\begin{cases} \mathbf{S}_0(t) & \text{se } t_0 \leq t < t_1 \\ \mathbf{S}_1(t) & \text{se } t_1 \leq t < t_2 \\ \vdots & \\ \mathbf{S}_{k-2}(t) & \text{se } t_{k-2} \leq t \leq t_{k-1} \end{cases} \quad (3.3)$$

Dada a necessidade de representar também a secção transversal do *yarn*, através de um plano de corte perpendicular à superfície deste, várias formas têm sido apresentadas para a sua descrição geométrica, incluindo a elipse proposta por Pierce [40], a *power ellipse* e uma forma lenticular modificada proposta por Hearle e Shanahan [43].

Todas as formas referidas anteriormente são descritas com base em funções paramétricas, tendo em comum a sua dependência de alguns parâmetros geométricos, como é o caso da altura do *yarn* ( $h$ ) e da sua largura ( $w$ ). Assim, a representação da secção elíptica pode ser caracterizada através de uma abordagem simplista, definida pelas relações

$$\mathbf{C}(t)_x = \frac{w}{2} \cos(2\pi t) \quad \text{para } 0 \leq t \leq 1 \quad (3.4)$$

$$\mathbf{C}(t)_y = \frac{h}{2} \sin(2\pi t) \quad \text{para } 0 \leq t \leq 1 \quad (3.5)$$

Por outro lado, a *power ellipse* é uma modificação da secção elíptica, onde a coordenada na direção  $Oy$  é associada a um fator  $n$ , de maneira a que a secção pareça um retângulo com os cantos arredondados quando  $n < 1$  ou se assemelhe a uma forma lenticular quando  $n > 1$ . Esta geometria é definida como

$$\mathbf{C}(t)_x = \frac{w}{2} \cos(2\pi t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (3.6)$$

$$\mathbf{C}(t)_y = \begin{cases} \frac{h}{2} \sin(2\pi t)^n & \text{se } 0 \leq t \leq 0.5 \\ -\frac{h}{2} [-\sin(2\pi t)]^n & \text{se } 0.5 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

A forma lenticular pode ser descrita através da interseção de dois círculos de raio  $r_1$  e  $r_2$ , onde cada um apresenta uma distância  $o_1$  e  $o_2$ , respetivamente, medidas na vertical a partir da origem do referencial, como se mostra na Figura 3.8, e do parâmetro  $d$  que representa a distância do centro da forma lenticular até ao seu topo. Antes de descrever a secção do *yarn* matematicamente é necessário calcular os parâmetros geométricos referidos através das relações

$$r_1 = \frac{w^2 + (h - 2d)^2}{4(h - 2d)} \quad (3.8)$$

$$r_2 = \frac{w^2 + (h + 2d)^2}{4(h + 2d)} \quad (3.9)$$

$$o_1 = -r_1 + \frac{h}{2} \quad (3.10)$$

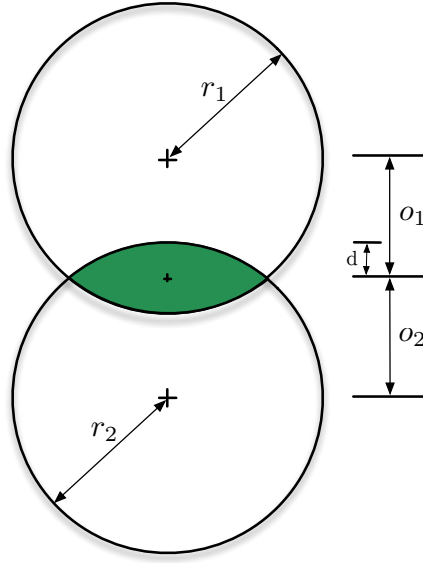


Figura 3.8: Origem geométrica da seção lenticular dos *yarns*.

$$o_2 = r_2 - \frac{h}{2} \quad (3.11)$$

Com isto, é assim possível descrever a secção como

$$\mathbf{C}(t)_x = \begin{cases} r_1 \sin \theta & \text{se } 0 \leq t \leq 0.5 \\ r_2 \sin \theta & \text{se } 0.5 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{C}(t)_y = \begin{cases} r_1 \cos \theta + o_1 & \text{se } 0 \leq t \leq 0.5 \\ -r_2 \cos \theta + o_2 & \text{se } 0.5 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

com

$$\theta = \begin{cases} (1 - 4t) \sin^{-1}\left(\frac{w}{2r_1}\right) & \text{se } 0 \leq t \leq 0.5 \\ (-3 + 4t) \sin^{-1}\left(\frac{w}{2r_2}\right) & \text{se } 0.5 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

Na Figura 3.9 encontra-se representada cada uma das descrições paramétricas das secções referidas com o mesmo valor de  $w$  e  $h$ , fixados em 2 e 1 unidades, respetivamente.

Por último, mas não menos importante, descreve-se a superfície fechada que representa o *yarn* e assume a geometria dada pelo trajeto e pela secção transversal. Dado o cruzamento das séries de *yarns* num tecido do tipo *plain weave* e uma vez que existe alguma compactação localizada nestes pontos, é-se conduzido a uma secção não constante ao longo do trajeto já definido. No entanto, de uma forma simplista, representa-se o tecido como tendo as secções transversais dos *yarns* constantes ao longo do seu trajecto. A equação

$$\mathbf{P}(u, v) = \mathbf{S}(u) + [\mathbf{C}(u, v)_x \mathbf{X}'(u) + \mathbf{C}(u, v)_y \mathbf{Y}'(u)] \quad a \leq u \leq b \quad \text{e} \quad 0 \leq v \leq 1 \quad (3.15)$$

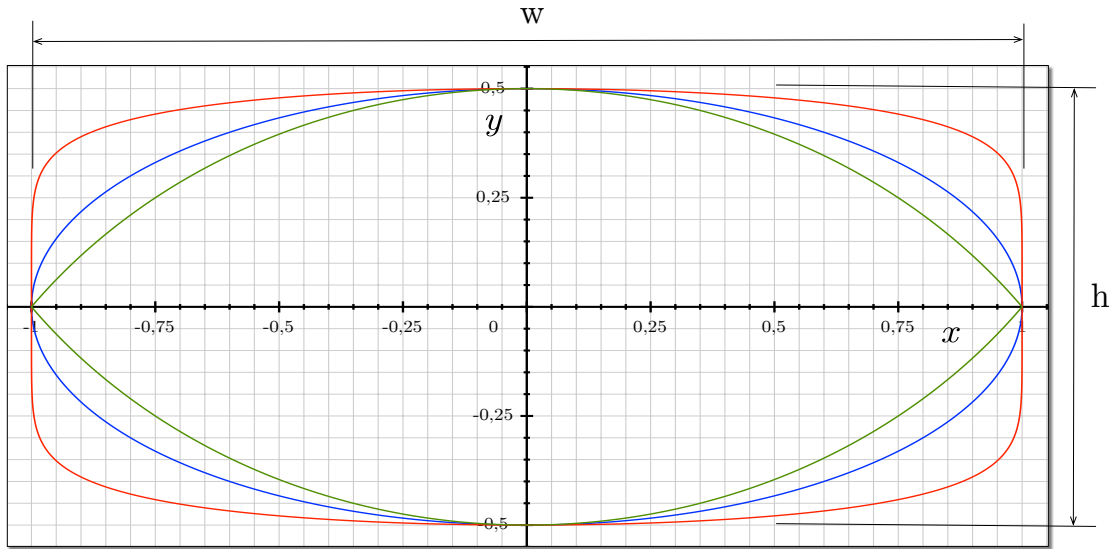


Figura 3.9: Representação das secções: lenticular com  $n = 0$  (verde), elíptica (azul) e *power-ellipse* com  $n = 0.5$  (vermelho).

onde  $\mathbf{X}'(u)$  e  $\mathbf{Y}'(u)$  são os sistemas de coordenadas locais, representa o somatório da interpolação realizada para o trajeto com a secção do *yarn* por forma a gerar uma superfície fechada, sendo esta dependente de duas variáveis  $u$  e  $v$  que exprimem a localização ao longo do *yarn* e os pontos de referência da secção, respetivamente, conforme é representado na Figura 3.10. Com esta descrição, é possível representar qualquer tecido constituído por entrelaçamento de *yarns*, bastando para isso acoplar células representativas unitárias em qualquer que seja a direção pretendida.

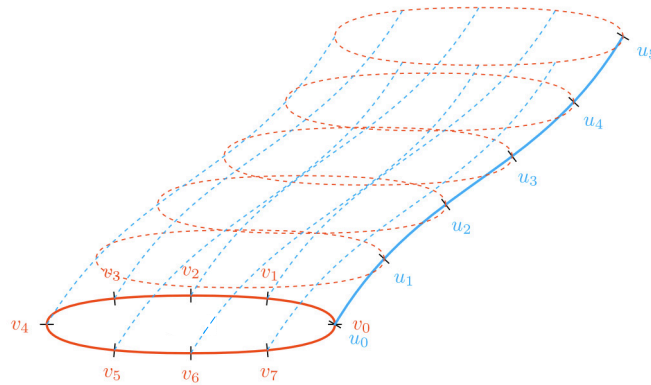


Figura 3.10: Superfície paramétrica de representação dos *yarns* (adaptado de [34]).

### 3.1.4 Propriedades mecânicas

O comportamento mecânico dos tecidos é essencialmente ditado pelas suas propriedades à tração. No entanto, a sua caracterização enfrenta algumas dificuldades, uma vez que, dada a constituição de um tecido, qualquer deformação no seu todo, por ligeira que seja,

origina um conjunto de movimentos complexos ao nível mesoscópico (*yarns*) e microscópico (fibras). Esta característica induz um comportamento que não segue a lei de Hooke para o regime elástico e provoca o aparecimento do efeito de histerese<sup>2</sup> quando sujeito a carregamentos cíclicos.

Na Figura 3.11 apresenta-se uma curva de tensão-deformação típica de um tecido. Como facilmente se verifica, na aproximação local à origem do referencial, o seu comportamento apresenta uma variação não-linear na zona inicial da curva, facto explicado pela natureza viscoelástica dos tecidos em geral.

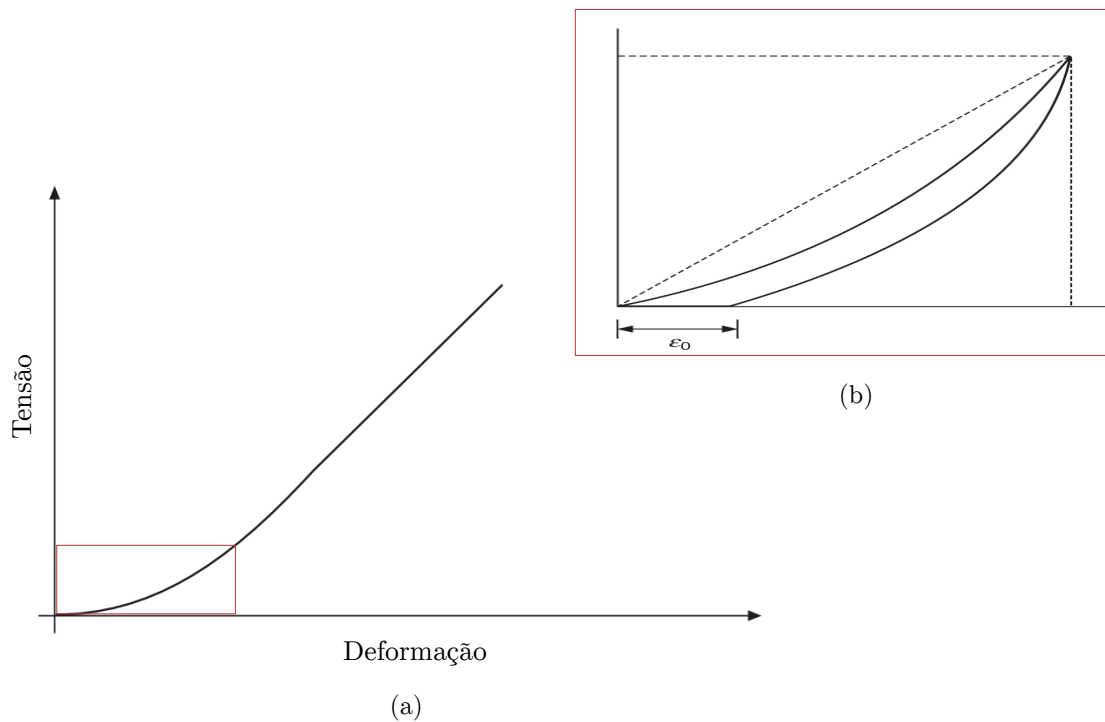


Figura 3.11: (a) Curva típica de tensão-deformação de um tecido do tipo *plain weave* com (b) pormenor incluindo a representação do efeito histerese (adaptado de [41]).

Para descrever analiticamente o comportamento genérico de um tecido, alguns autores recorrem a uma função exponencial do tipo

$$\sigma = \frac{e^{\alpha\epsilon} - 1}{\beta} \quad (3.16)$$

onde  $\sigma$  é a tensão aplicada,  $\epsilon$  a deformação e  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros determinados experimentalmente para caracterizar cada tecido. Esta determinação faz-se normalmente com recurso a dois pontos experimentais  $(\sigma, \epsilon)$  [41].

Quando um tecido está sujeito a uma solitação de tração numa das suas direções principais, a série de *yarns* na direção do carregamento perde alguma da amplitude do seu ondulado, assumindo uma configuração mais lisa, enquanto que na outra série

<sup>2</sup>O efeito de histerese é um fenómeno que ocorre quando o material apresenta dependência histórica, isto é, quando deixa de estar sujeito a um esforço não tem capacidade para recuperar a sua forma na totalidade, embora nunca tenha entrado em regime plástico.

acontece precisamente o oposto, aumentando a sua ondulação. Assim, uma grande parte da deformação sofrida pelos tecidos numa situação como esta surge justamente pela alteração de geometria dos *yarns* aquando do carregamento.

Por outro lado, numa solicitação na direção oblíqua a qualquer uma das séries de *yarns*, as características mecânicas do tecido são ligeiramente melhores do que quando solicitado nas condições anteriores. Este efeito conduz rapidamente à anisotropia que caracteriza intrinsecamente os tecidos. Este comportamento deve-se principalmente ao facto de a maioria dos tecidos terem uma estrutura simétrica, como é o caso dos tecidos do tipo *satín weave* e *plain weave*.

Deste modo, a direção do carregamento de tração influencia diretamente o modo como o tecido se comporta, sendo que uma solicitação numa das direções principais induz um comportamento regido pelas características do tecido à tração, enquanto que quando solicitado numa direção não principal é o comportamento ao corte que prevalece.

Assim, torna-se extremamente relevante o estudo do comportamento dos tecidos pelo facto das suas características poderem ser totalmente aproveitadas consoante a aplicação. A anisotropia do material aliada à sua larga deformação e quase total recuperação de forma representam uma combinação que catapulta os tecidos para um leque muito amplo de aplicações.

## 3.2 O Kevlar<sup>®</sup>

Constituído por fibras de aramida sintética e desenvolvido em 1965 pela firma DuPont<sup>™</sup>, o Kevlar<sup>®</sup> surge inesperadamente quando Kwolek tentava desenvolver uma nova fibra para usar em pneus de competição e reduzir a dependência do aço, de modo a torná-los mais leves [44]. Nesta altura, e com a indústria de polímeros bastante reduzida, Kwolek começou a misturar diferentes monómeros e daí surgiu uma mistura que revelava um comportamento completamente inesperado, apresentando um aspeto fluido e muito turvo. Após a produção de fibras com base nessa mistura, o resultado revelou-se numa fibra mais forte e resistente que qualquer outra antes conhecida [45].

### 3.2.1 Propriedades e estrutura molecular

Conhecidas pela sua elevada resistência, as fibras de Kevlar<sup>®</sup> são constituídas por largas cadeias moleculares produzidas a partir de poliparafenileno tereftalamida.

O alinhamento destas cadeias de forma paralela ao eixo das fibras e o facto de cada cadeia ter as suas moléculas perfeitamente alinhadas confere ao Kevlar<sup>®</sup> uma combinação de propriedades únicas: elevada resistência à tração, baixo peso, rigidez estrutural, elevada resistência química e resistência ao corte e ao fogo. Quando comparado com o aço, o Kevlar<sup>®</sup> apresenta uma resistência específica (por unidade de massa) cerca de sete vezes superior.

Outra característica que confere ao Kevlar<sup>®</sup> as propriedades mencionadas é o facto de a aramida formar ligações de hidrogénio entre as cadeias moleculares, que funcionam como uma ligação estrutural que liga as várias cadeias, aumentando a sua rigidez. Na Figura 3.12 encontra-se representada a estrutura molecular do Kevlar<sup>®</sup> [2, 45].

No que diz respeito à sua conservação, apesar de quimicamente estável, o Kevlar<sup>®</sup>

apresenta alguma degradação quando colocado em contacto com soluções ácidas e básicas fortes [45].

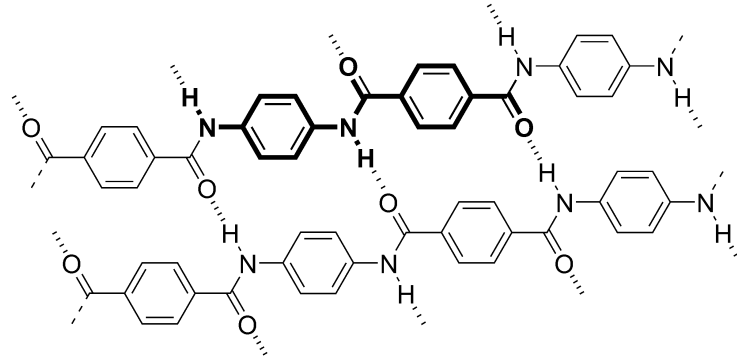


Figura 3.12: Estrutura molecular do Kevlar<sup>®</sup>, com monómero unitário a negrito e ligações de hidrogénio a tracejado [46].

### 3.2.2 O Kevlar-29<sup>®</sup>

As fibras aramídicas utilizadas neste trabalho — Kevlar-29<sup>®</sup> — pertencem à família Kevlar<sup>®</sup> e são usadas para o fabrico de têxteis de elevada resistência, sendo especialmente indicadas para o uso em áreas onde a resistência ao impacto é de importância extrema, como é o caso de armaduras de segurança e aplicações onde a resistência ao corte seja também valorizada, como cabos, cordas e luvas técnicas [47]. As suas propriedades mecânicas encontram-se resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades físicas e mecânicas do Kevlar-29<sup>®</sup> [11].

Propriedade	Kevlar-29 <sup>®</sup>	Unidade
Densidade	1440	kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	70.3	GPa
Coefficiente de Poisson	0.36	–
Tensão de cedência	2920	MPa
Deformação de rotura	0.036	–

Quando processado para a forma de tecido, o Kevlar-29<sup>®</sup> apresenta uma configuração *plain weave*, em que os seus *yarns* apresentam uma secção transversal com uma geometria lenticular. Na Figura 3.13 encontra-se representada uma imagem obtida através de um microscópio ótico de um tecido de Kevlar-29<sup>®</sup>, onde se pode observar a geometria que a secção do *yarn* apresenta.

O Kevlar-29<sup>®</sup> é amplamente utilizado em proteção balística. Esta escolha prende-se por uma combinação de fatores associados às suas propriedades ao nível das fibras singulares, referidas anteriormente, mas também ao facto da configuração do tecido possuir uma elevada taxa de entrelaçamento, o que minimiza o escorregamento dos *yarns* e dificulta a perfuração por parte do impactor.



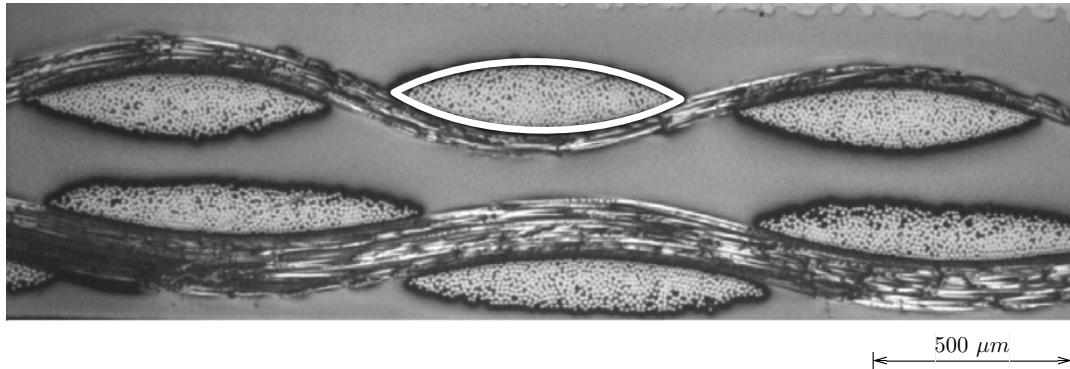


Figura 3.13: Observação de tecido de Kevlar-29<sup>®</sup> ao microscópio ótico [48].

A energia de impacto num tecido deste tipo é absorvida sob a forma de energia de deformação (tração) pelos *yarns* e dissipada através da propagação das ondas de tensão nas direções do plano do tecido e do atrito existente nas zona de cruzamento das séries de *yarns*. A única desvantagem associada ao facto de haver uma elevada taxa de entrelaçamento é que isso diminui a velocidade de propagação das ondas de tensão. No entanto, uma vez que este material possui um elevado módulo de Young, tal desvantagem acaba por se tornar pouco relevante face às mais-valias que o tecido oferece [2, 49].

### 3.2.3 Aplicações do Kevlar<sup>®</sup>

Contrariamente ao senso comum, o Kevlar<sup>®</sup> não é apenas utilizado para fins militares e de proteção, apesar de ser esta a aplicação que o popularizou. Existem muitas outras aplicações comerciais tais como, por exemplo, os equipamentos de desporto, indústria dos pneus, utensílios técnicos e revestimentos de material tecnológico, revestimentos de cabos de transmissão de dados, *etc.*

A indústria de fabrico de pneus, principalmente aplicada à inovação em ambientes de competição motorizada, tem-se revelado cada vez mais adepta da inclusão de Kevlar<sup>®</sup> nos seus produtos, como se pode observar na Figura 3.14a, onde o Kevlar<sup>®</sup> é utilizado como reforço estrutural da borracha do pneu. A sua elevada resistência estrutural aliada à sua baixa densidade, auxiliam os fabricantes no objetivo de reduzir a resistência associada à rotação do pneu e aumentar a precisão de condução [45].

Também artigos utilizados diariamente são alvo da introdução de Kevlar<sup>®</sup> na sua constituição. Exemplo disso são as luvas técnicas utilizadas por profissionais que combinam uma elevada resistência ao corte com uma utilização confortável (Figura 3.14b). Produtos desportivos como tacos de hóquei, raquetes de ténis, botas de montanhismo ou tacos de baseball também são exemplos de aplicação do Kevlar<sup>®</sup>.

No que toca à proteção contra impactos, o Kevlar<sup>®</sup> é também bastante utilizado no revestimento de cascos de embarcações de recreio e competição, como veleiros, canoas e caiaques. A sua aplicação consiste na conformação de painéis de tecido com a geometria do casco e a sua impregnação em resina, de modo a fixar o Kevlar<sup>®</sup> ao barco e formar uma peça única, em material compósito, conforme ilustrado na Figura 3.14c.

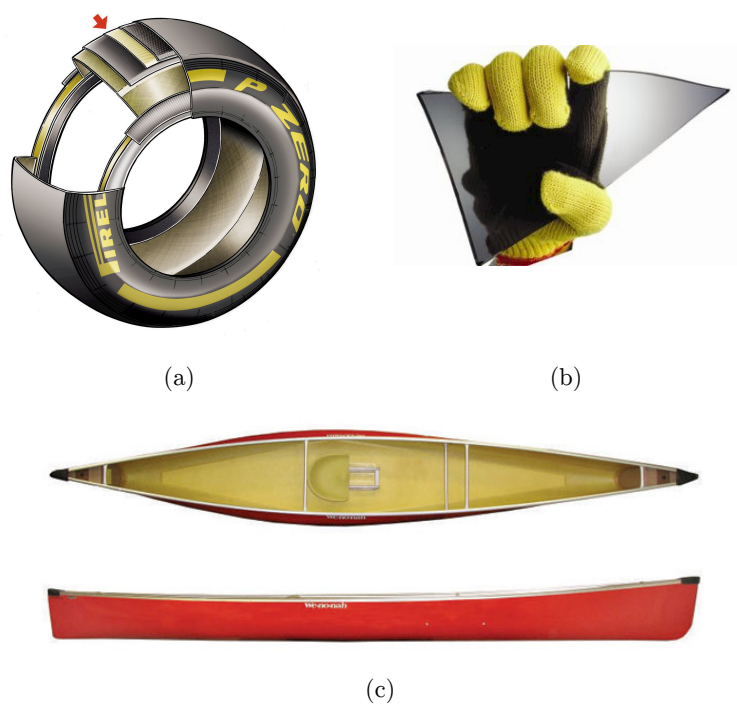


Figura 3.14: Aplicações comerciais do Kevlar<sup>®</sup>: (a) composição estrutural de pneus, (b) utensílios técnicos resistentes ao corte e (c) revestimentos estruturais (adaptado de [33, 50, 51]).

## Capítulo 4

# Materiais celulares

Como referido anteriormente, a procura de soluções para o desenvolvimento de novos sistemas de proteção pessoal passa pela exploração da capacidade dos materiais na realização dos objetivos a que são propostos. Segundo Sousa-Martins [52, 53], os materiais celulares e estruturas do tipo favo-de-abelha constituem ótimos candidatos a desempenhar esse papel.

Os materiais celulares são assim designados devido à sua estrutura ser composta por células vazias, que podem ser abertas ou fechadas, onde a fração do volume de sólido não excede os 30% [54]. Por outro lado, os materiais celulares podem ser naturais ou sintéticos. Como exemplo dos primeiros destacam-se a madeira, o osso, o coral e a cortiça, entre outros. Já os materiais celulares sintéticos têm como base diversos outros materiais, como metais, cerâmicos, papel, vidro ou polímeros, *etc.* Na Figura 4.1 encontram-se representados alguns exemplos de materiais celulares.

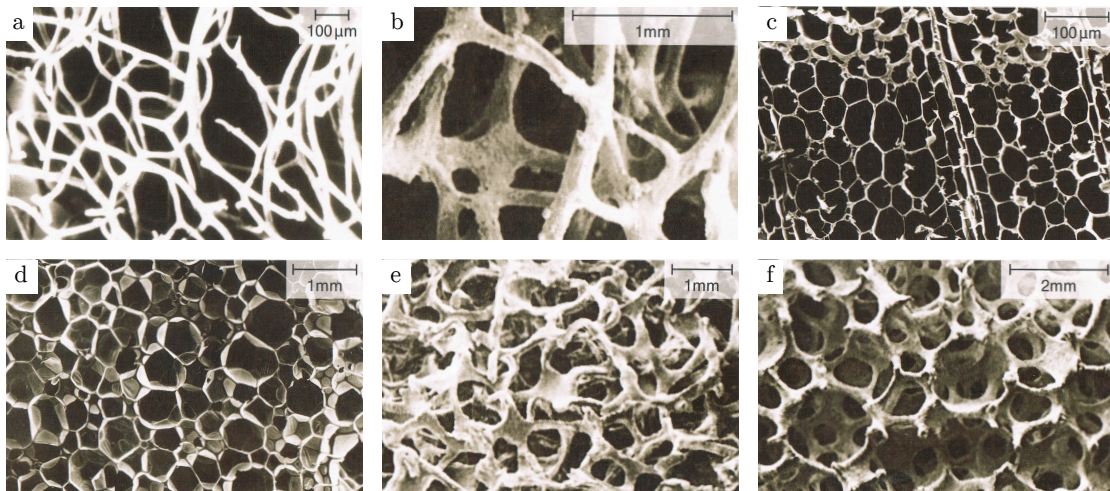


Figura 4.1: Exemplos de materiais celulares: (a) esponja, (b) osso, (c) madeira de balsa, (d) poliuretano expandido, (e) espuma de cobre e (f) espuma de zircónia (adaptado de [54]).

No que toca à sua caracterização mecânica, estes materiais são usualmente possuidores de uma curva tensão-deformação com um comportamento típico, representado de forma esquemática na Figura 4.2. É notório que estas matérias apresentam um compor-

tamento aproximadamente linear-elástico até atingir a tensão de cedência ( $\sigma_c$ ), a partir da qual apresentam um patamar de tensão. A partir de um certo ponto, as paredes celulares atingem o limite de resistência e iniciam um processo de colapso ( $\varepsilon_d$ ), pelo que se entra numa região da curva denominada por *região de densificação* [52].

O comportamento destes materiais quando sujeitos a cargas de compressão tem sido uma das grandes janelas de interesse para a sua implementação em sistemas de proteção pessoal e absorção/dissipação de energia ao longo das últimas décadas [55].

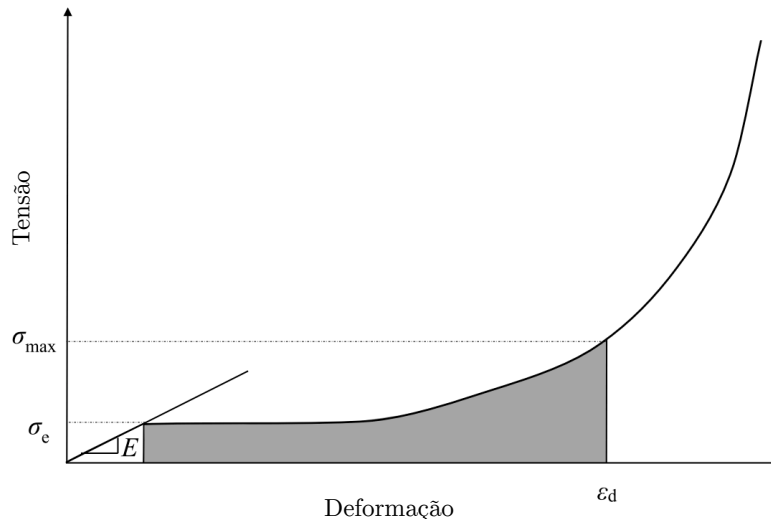


Figura 4.2: Curva típica de tensão-deformação de um material celular [52].

## 4.1 A cortiça como matéria-prima

A cortiça é um material celular que tem sido utilizado pelo Homem nos últimos 5000 anos e representa uma matéria-prima estratégica para aplicações das mais variadas naturezas [56]. Na sua origem, a cortiça está intimamente ligada ao sobreiro, nomeadamente a espécie *Quercus suber L.*, que encontra as condições ótimas de pluviosidade, humidade e luz solar para o seu crescimento nas zonas mediterrânicas do sul da Europa e Norte de África [57], especificamente em países como Espanha, Itália, Argélia e Portugal. Portugal que, neste caso, possui cerca de 60% da área mundial da cultura do sobreiro e se destaca assim como o maior produtor do mundo de cortiça, com um parcela de mercado de cerca de 80% [56].

A cortiça é a casca exterior da espécie de sobreiro mencionada, em que a sua existência é justificada do ponto de vista do ecossistema como a camada que protege as células vivas do tronco e dos ramos de fatores externos tais como, por exemplo, o ambiente ou animais.

Na ótica do desenvolvimento, o sobreiro é uma árvore de crescimento bastante lento que consegue atingir uma longevidade de quase 300 anos, sendo que, para produção efetiva de cortiça, esta idade não passa para além dos 200 anos [58]. A produção industrial de cortiça inicia-se com a sua extração, ou *desbóia*, que é um processo que ocorre normalmente entre o fim da Primavera e o início do Verão, com intervalos mínimos de 9 anos entre cada extração. A primeira desbóia ocorre para uma idade da árvore de cerca de 25 a 30 anos. A cortiça resultante deste processo é designada por *cortiça virgem*. Na

realidade, a primeira e segunda extrações não devolvem cortiças de qualidade devido à presença de sulcos e fendas resultantes das fraturas que ocorrem face às fortes tensões tangenciais provocadas pelo crescimento do tronco da árvore. Estas primeiras extrações de cortiça, com menor qualidade, são aproveitadas para aplicações consideradas menores, como quadros, isolamentos, solas de calçado, *etc.* Assim, apenas a partir da terceira desbóia é possível obter cortiça com qualidade superior e que pode efetivamente ser utilizada para aplicações tecnicamente mais exigentes, como é o caso da impermeabilidade das tradicionais rolhas de cortiça. A cortiça proveniente desta extração e das seguintes toma o nome de *amadria* e encontra-se num estado perfeito para a desbóia quando as pranchas de cortiça apresentam entre 25 e 30 milímetros de espessura [57].

Em boa verdade, não é correto referir que a cortiça é um produto exclusivo do *Quercus suber L.* Na realidade um grande número de árvores apresentam uma fina camada deste material, mas o que distingue esta espécie de todas as outras árvores é o facto de ser a única que apresenta espessuras consideráveis, tornando a sua extração viável.

#### 4.1.1 Estrutura

A cortiça foi um dos primeiros materiais que Robert Hooke observou ao microscópio no século XVII. Foi esta observação que lhe permitiu concluir que este material possui uma estrutura tridimensional composta por células prismáticas de paredes finas, organizadas de forma regular e sem espaços vazios entre elas. Na Figura 4.3 está representado um esboço da estrutura celular da cortiça feito por Hooke [59].

Como material celular que é, a cortiça tem uma fração volúmica de sólido de cerca de 15% e a sua estrutura possui uma densidade entre 4 e  $20 \times 10^7$  células/cm<sup>3</sup> [61]. Natividade, no seu livro *Subericultura* [62], descreve a cortiça como sendo "... uma rede de membranas, um agregado de tabiques, verdadeiro esqueleto, delimitando as células ou alvéolos... cheios de ar...". Destas estruturas alveolares, sabe-se que as paredes celulares são principalmente compostas por *suberina*, um biopolímero responsável pelo carácter impermeável da cortiça, que se apresenta associado à *lenhina*, que possui funções de suporte para a geometria dos alvéolos, e à celulose. Na Figura 4.4a mostra-se a composição das membranas celulares.

No sentido de descrever mais detalhadamente a estrutura celular da cortiça, e uma vez que uma observação direta da estrutura tridimensional não é possível, é necessário referir e identificar as secções planas convencionadas para a sua total representação. Assim, definem-se 3 direcções principais e 3 secções correspondentes, perpendiculares a elas, nomeadamente a direcção radial (segundo o raio do tronco), a direcção axial (no sentido do eixo do tronco) e a direcção tangencial à circunferência do tronco. De forma a simplificar esta identificação, nas Figuras 4.4b e 4.5 são apresentados um diagrama representativo e imagens das 3 secções, respetivamente. Segundo este diagrama, é facilmente identificável que as células têm uma secção de forma hexagonal na direcção radial e uma secção rectangular nas direcções tangencial e axial.

#### 4.1.2 Propriedades mecânicas

A estrutura celular da cortiça é a principal responsável pelo seu comportamento mecânico e por algumas das propriedades deste material que, em conjunto, formam um incomum leque de características que passam por potenciarem elevados coeficientes de atrito, bom

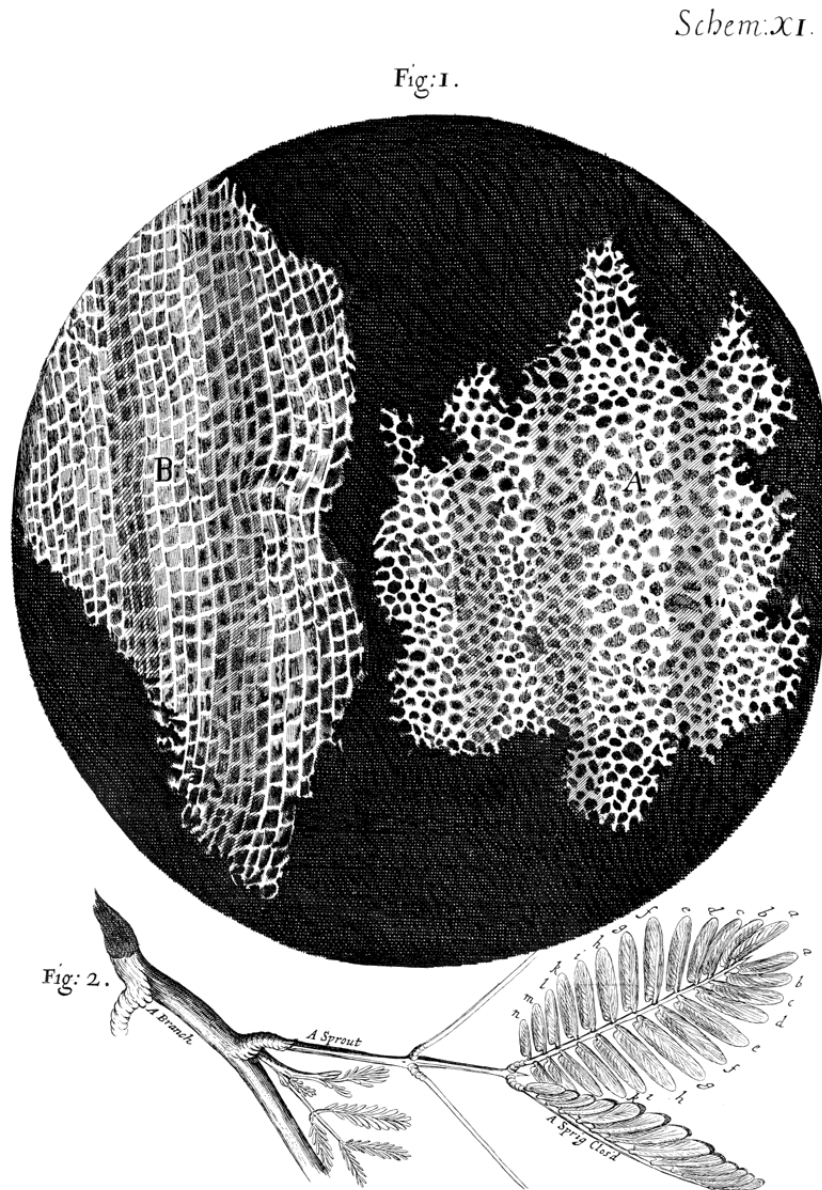


Figura 4.3: Esboço da estrutura celular da cortiça realizado por Robert Hooke e publicado no seu livro *Micrographia* em 1665 [60].

isolamento térmico e sonoro, boa resistência ao calor e química, impermeabilidade a líquidos, entre outras [63].

No caso particular do elevado coeficiente de atrito, este é justificado pelo facto de os alvéolos da cortiça serem abertos nas faces do material. Esta propriedade mecânica constitui um dos principais propósitos desta dissertação e será detalhada mais à frente.

Ao longo dos anos, diversos estudos têm vindo a ser publicados com especial enfoque para as propriedades mecânicas da cortiça. Uma das principais conclusões destes estudos é a variação do módulo de Young segundo a direção de carregamento na estrutura celular.

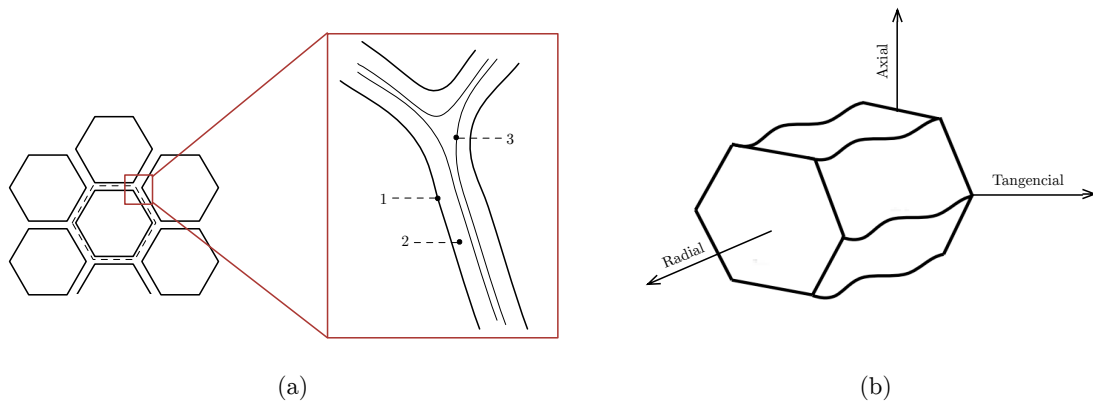


Figura 4.4: (a) Composição química das paredes celulares da cortiça (1-celulose, 2-suberina e 3-lenhina), (b) direções principais convencionadas para representação da célula de cortiça (adaptado de [57]).

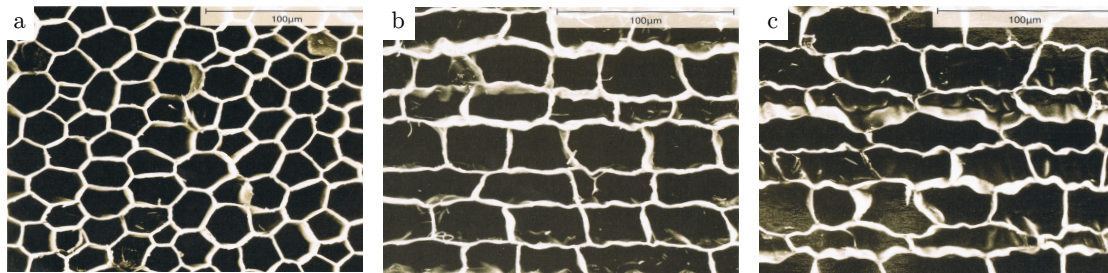


Figura 4.5: Microscopia eletrônica de varrimento das seções: (a) radial, (b) axial e (c) tangencial [54].

Neste campo, alguns autores verificaram que o módulo de Young da cortiça é cerca de 1.5 vezes maior na direção radial do que nas outras duas direções. Mais ainda, este módulo é consideravelmente menor quando a cortiça é sujeita a cargas de compressão do que quando sujeita a esforços de tração [52, 57].

Apesar dos materiais no geral terem o seu comportamento à tração melhor documentado, é à compressão que a cortiça se encontra melhor descrita na literatura, muito devido às suas aplicações serem maioritariamente sujeitas a este tipo de sollicitação. Na Tabela 4.1 estão reunidas as principais propriedades mecânicas da cortiça, que tem o seu comportamento à compressão semelhante ao apresentado na Figura 4.2.

### 4.1.3 Coeficiente de atrito

A cortiça é um material com uma combinação de características única, como referido anteriormente. No entanto, uma das propriedades que lhe confere maior vantagem em muitas aplicações, e que se encontra muito pouco estudada na literatura, é o potencial para gerar coeficientes de atrito elevados. Um dos principais fatores responsável pelo elevado coeficiente de atrito que a cortiça gera é, à semelhança de outras propriedades, a sua estrutura alveolar. Apesar da cortiça ser constituída por células fechadas, quando cortada a sua superfície apresenta células abertas, pelo que as paredes celulares serão as

Tabela 4.1: Propriedades físicas e mecânicas da cortiça em solicitação à compressão [57, 64].

<b>Densidade</b>		
Cortiça amadia		120-180 kg/m <sup>3</sup>
Cortiça virgem	$\rho$	160-240 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Young</b>		
Direção tangencial	$E_t$	13± 5 MPa
Direção axial	$E_a$	
Direção radial	$E_r$	20±7 MPa
<b>Módulo de corte</b>		
Plano tangencial-axial	$G_{ta}$	4.3±1.5 MPa
Plano tangencial-radial	$G_{tr}$	2.5±1 MPa
Plano axial-radial	$G_{ar}$	
<b>Tensão limite de elasticidade</b>		
Direção tangencial	$\sigma_{et}$	0.7±0.2 MPa
Direção axial	$\sigma_{ea}$	
Direção radial	$\sigma_{er}$	0.8±0.29 MPa
<b>Tensão de fratura</b>		
Direção tangencial	$\sigma_{ft}$	1.1±0.2 MPa
Direção axial	$\sigma_{fa}$	
Direção radial	$\sigma_{fr}$	1±0.2 MPa
<b>Coefficiente de Poisson</b>		
Plano tangencial-axial	$\nu_{ta} = \nu_{at}$	0.25-0.50
Plano tangencial-radial	$\nu_{tr} = \nu_{rt}$	0-0.1
Plano axial-radial	$\nu_{ar} = \nu_{ra}$	

primeiras a experimentar contacto com outros materiais, induzindo elevados coeficientes de atrito [53].

As aplicações que tiram partido desta característica da cortiça constituem um leque abrangente que vão desde as simples rolhas de cortiça em contacto com o gargalo das garrafas até às solas do calçado. Assim, tentando tirar partido do elevado coeficiente de atrito, este trabalho concentra também algum detalhe no seu aproveitamento para fins de dissipação de energia.

O principal método de dissipação de energia que é útil ter em conta neste documento é a transformação de energia cinética em calor. No entanto, a cortiça apresenta ainda outro mecanismo de dissipação de energia: a perda inelástica. Este mecanismo deriva do facto da cortiça não ser um material perfeitamente elástico e, assim, não recuperar na totalidade a sua forma após a remoção de uma carga de compressão. Este aspeto pode ser caracterizado por um coeficiente de perda. A energia dissipada por este efeito é representada esquematicamente na Figura 4.6 através da zona interior à curva [65].

## 4.2 Micro-aglomerados de cortiça

Dada a estrutura celular da cortiça e a dispersão dos seus alvéolos, quer em dimensão quer em geometria, facilmente se reconhece que as características deste material na sua forma



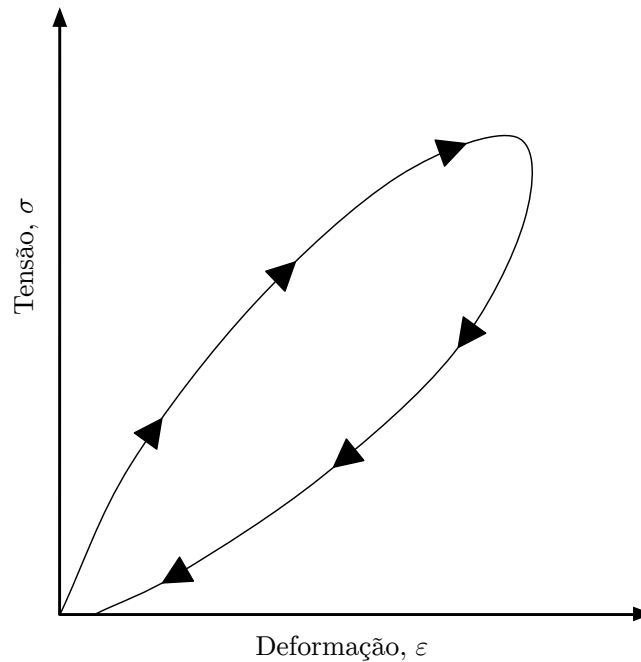


Figura 4.6: Representação esquemática da perda de energia na cortiça devido ao coeficiente de perda inelástica [65].

natural não são constantes nem previsíveis. Mais ainda, os defeitos existentes na cortiça devido ao seu crescimento levam a que, para determinadas aplicações, a sua qualidade não seja a desejável. Numa abordagem de engenharia, esta dispersão de propriedades pode tornar-se um impedimento quando se inicia um projeto onde se pretende incluir este material celular.

No entanto, no final do século XIX, um produtor americano de coletes de salvação marítima descobriu acidentalmente que era possível produzir aglomerados de cortiça a partir de grânulos deste material. Charles McManus, alguns anos mais tarde, inventou o micro-aglomerado de cortiça composto, que representa a adição de outros materiais no sentido de agregar o granulado de cortiça [56].

Os aglomerados podem ser divididos em duas sub-categorias distintas: (i) os aglomerados de cortiça puros e (ii) os aglomerados compostos. A primeira categoria representa a compactação direta de grânulos deste material sem a adição de qualquer tipo de adesivo ou resina. Já quando se refere os aglomerados compostos, é necessário ter em mente que estes advêm da compactação dos grãos de cortiça com recurso a materiais adesivos (poliuretano, melamina, borracha, *etc.*), sendo que as propriedades físicas e químicas do material aditivo são determinantes naquelas que serão as propriedades do micro-aglomerado de cortiça (MAC).

Os micro-aglomerados compostos são produzidos através dos desperdícios da produção de rolhas, cortiça de qualidade inferior e também de cortiça virgem. O granulado que compõe os aglomerados é obtido pela passagem desta cortiça por moinhos e pela sua trituração. A estes grânulos são adicionados agentes adesivos para posteriormente colocar esta mistura em moldes que, depois de curado o adesivo, resulta nos MAC.

Consequentemente, os MAC têm comportamento isotrópico, o que lhes confere ótimas

características que se evidenciam em aplicações de engenharia.

Como referido, um dos objetivos desta dissertação é avaliar o potencial da utilização de micro-aglomerados de cortiça para dissipação de energia resultante de ameaças com objetos pontiagudos e cortantes a que estão sujeitos os equipamentos flexíveis de proteção pessoal atuais.

Assim, explorando o elevado coeficiente de atrito entre a cortiça e os metais, neste trabalho é investigado o micro-aglomerado de cortiça NL20, pertencente à gama de produtos CORECORK<sup>®</sup>, produzidos pela Amorim Cork Composites. Esta gama de produtos, que inclui ainda o NL10, NL25, TB40 e TB50, oferece excelentes características no que toca a proteção contra fogo, fumo e ambientes tóxicos, bem como um comportamento mecânico com bastantes potencialidades e baixo índice de absorção de água [66]. Estes produtos estão disponíveis no mercado sob a forma processada de blocos, folhas, rolos e tiras, sendo possível a sua produção com dimensões personalizáveis. A grande distinção entre os diferentes tipos de MAC referidos é, essencialmente, a densidade e as propriedades que dela dependem.

Na Tabela 4.2 encontram-se as propriedades do micro-aglomerado de cortiça em estudo e na Figura 4.7 mostra-se a curva de tensão-deformação deste à compressão.

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas do micro-aglomerado de cortiça NL20 [66].

Propriedade	NL20	Unidades
Densidade	200	kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young (compressão)	0.006	GPa
Resistência à compressão	0.5	MPa
Resistência à tração	0.7	MPa
Resistência ao corte	0.9	MPa
Módulo de corte	0.0059	GPa

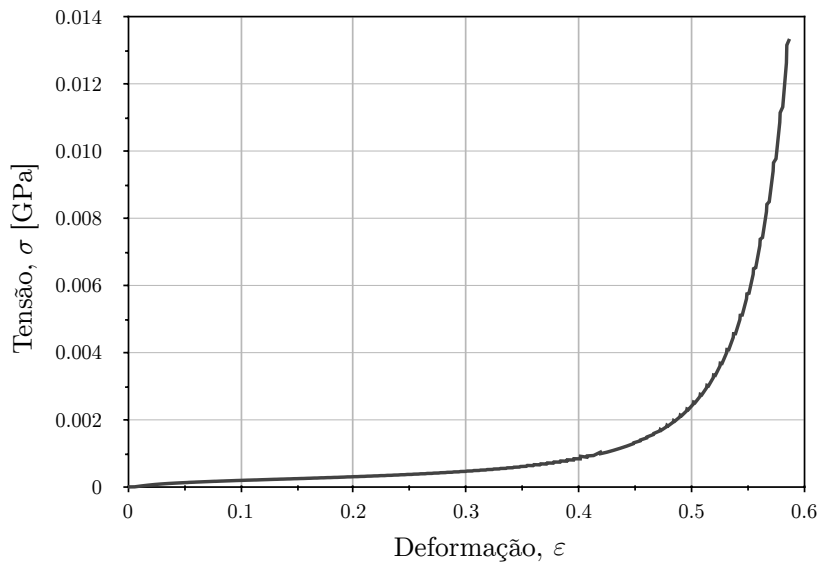


Figura 4.7: Curva tensão-deformação do MAC NL20.

Parte II

Métodos e modelos



## Capítulo 5

# Método dos elementos finitos

### 5.1 Introdução

Com a crescente exigência que os estudos de processos envolvem nos dias de hoje, torna-se inviável realizar um estudo analítico desses mesmos processos dada a exigência de cálculo e o conjunto de variáveis que muitas vezes envolvem. Neste sentido, a mecânica computacional desempenha um papel de extrema importância na resolução deste problema, atuando como fonte de cálculo mas também como fonte de comparação com atividades experimentais, sendo que desempenha aqui também uma ação de redução de custos, uma vez que, embora não as invalide, auxilia na redução das atividades experimentais e os custos a elas inerentes.

O método dos elementos finitos (MEF) surgiu pela primeira vez de forma explícita em 1960 através do trabalho de Ray Clough [67] sobre a análise de problemas de elasticidade em estado plano de tensão. Ficaram assim estabelecidos os procedimentos que estão na base da implementação computacional do MEF. Este método é utilizado numa vasta gama de aplicações, como o estudo do comportamento de materiais, problemas de condução de calor e de mecânica de fluidos, sistemas vibratórios, *etc.* [67].

O MEF é num método matemático numérico que descreve o meio contínuo sujeito a análise através de domínios mais pequenos, designados por elementos, e interligados com recurso a rótulas virtuais localizadas nos vértices dos elementos, designadas por nós. Através de equações diferenciais que descrevem estes elementos e de métodos matemáticos específicos é possível obter deslocamentos, tensões, deformações, *etc.* A aplicação deste método numa abordagem de engenharia envolve três componentes distintas:

1. Pré-processamento
2. Análise
3. Pós-processamento

A fase do pré-processamento está intimamente ligada à construção do modelo geométrico a analisar e à sua discretização em meios mais pequenos, bem como à definição de todas as características que lhe são intrínsecas. É nesta fase que se definem os carregamentos a impor ao modelo, condições fronteira, propriedades físicas e mecânicas, *etc.* Os eventuais erros que surgem na fase da análise têm, frequentemente, origem numa má definição das características do problema.

A etapa de análise prende-se com a verificação do ficheiro de entrada, resultante da primeira etapa, e na realização dos cálculos necessários à resolução das equações subjacentes ao procedimento do MEF. Como resultado desta fase são gerados ficheiros com os resultados que se vão acumulando ao longo do cálculo.

Por último, depois de realizados todos os cálculos, o pós-processador encarrega-se de apresentar a informação contida nos ficheiros de saída. Desta forma o utilizador tem acesso à informação de uma forma simplificada, que pode ser apresentada na forma de gráficos, tabelas, isovalores, *etc.* Como vantagem, os programas que fazem uso deste método permitem, na sua grande maioria, a rotação do modelo geométrico por forma a avaliar a alteração do mesmo ao longo do tempo. Na Figura 5.1 é possível observar os principais passos de cada uma das etapas anteriormente referidas.

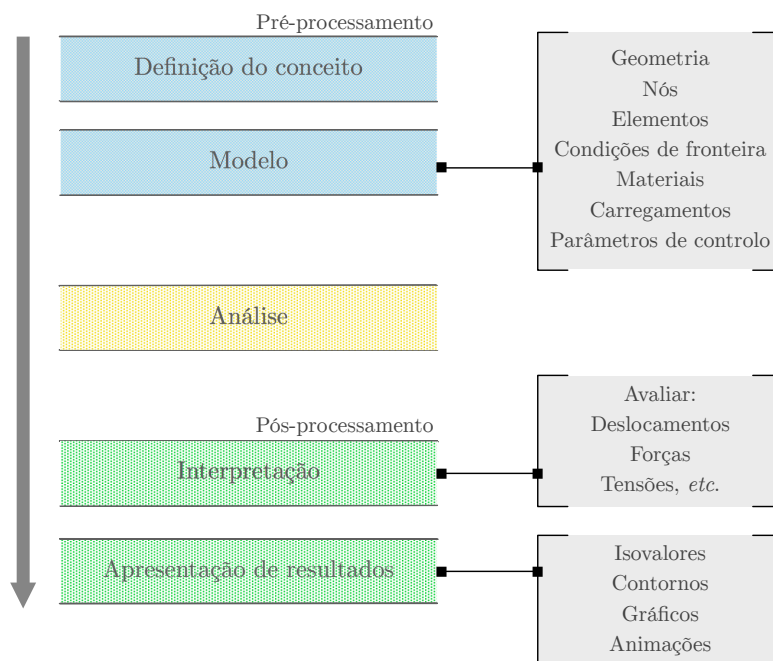


Figura 5.1: Metodologia de análise de um problema com utilização do método dos elementos finitos (adaptado de [67]).

Como será descrito detalhadamente no ponto seguinte, existem duas abordagens possíveis quando se recorre ao método dos elementos finitos para a resolução de problemas dinâmicos. A principal diferença entre elas é a forma como é levada a cabo a integração temporal de um sistema dinâmico.

## 5.2 Integração temporal

Numa análise de um problema estático, as massas envolvidas são deslocadas com uma velocidade tão reduzida que não originam forças de inércia significantes. Desta forma, a solução do problema surge da resolução direta de um sistema de equações do tipo

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}\mathbf{a} \quad (5.1)$$

onde  $\mathbf{f}$  é o vetor de forças aplicadas,  $\mathbf{K}$  a matriz de rigidez do problema,  $\mathbf{a}$  o vetor de deslocamentos e onde o tempo não desempenha nenhum papel na obtenção do resultado. Pelo contrário, numa análise dinâmica, em que a velocidade imposta às massas do sistema não é desprezável, o resultado é obtido através da integração das equações do movimento ao longo do tempo, por forma a calcular as variáveis desejadas em cada posição de tempo e registar a evolução do sistema [68].

Como referido anteriormente, existem duas grandes abordagens no método dos elementos finitos no que toca à integração de tempo na resolução de problemas dinâmicos: (i) o método implícito e (ii) o método explícito. A resolução deste tipo de problemas envolve a resolução de um sistema de equações mais complexas que se apresentam na forma matricial

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f} \quad (5.2)$$

em que  $\mathbf{M}$  é a matriz de massa,  $\mathbf{C}$  é a matriz de amortecimento,  $\mathbf{K}$  é a matriz de rigidez,  $\mathbf{f}$  o vetor de forças aplicadas e  $\mathbf{x}$ ,  $\dot{\mathbf{x}}$  e  $\ddot{\mathbf{x}}$  os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração, respetivamente. A grande diferença entre os dois métodos é a forma como são utilizados para resolver o sistema de equações.

O esquema implícito, também designado por esquema de integração de Euler, realiza o cálculo do instante de tempo atual através daquilo que foi calculado no instante de tempo anterior. Com isto, este esquema calcula diretamente o vetor  $\mathbf{x}$  através da inversão da matriz de rigidez  $\mathbf{K}$ , o que significa que cada iteração tem um grande custo computacional.

Por outro lado, o esquema de integração explícita, ao invés de resolver o sistema de equações em ordem ao vetor  $\mathbf{x}$ , resolve diretamente em relação a  $\ddot{\mathbf{x}}$ . Isto requer apenas a inversão da matriz  $\mathbf{M}$  que, pelo facto de ser uma matriz diagonal ou em banda, impõe um custo computacional reduzido. O facto de cada instante de tempo ser calculado de forma independente leva a que possa existir alguma instabilidade numérica, uma vez que não há um registo histórico das variáveis. Por isto, num cenário dinâmico, e especialmente em situações de impacto, é preferível a utilização do esquema de integração explícito.

Um grande número de *softwares* comerciais com implementação do MEF têm incorporados algoritmos de resolução de problemas dinâmicos através de integração explícita. Exemplo disto são o Abaqus<sup>®</sup>, ANSYS<sup>™</sup>, AUTODYN<sup>™</sup> e LS-DYNA<sup>™</sup>. Dado o robusto algoritmo que o LS-DYNA<sup>™</sup> apresenta num cenário de integração explícita, ao longo deste trabalho será utilizado este *software* no sentido de realizar as simulações numéricas necessárias.





## Capítulo 6

# Modelação numérica

Para a realização dos testes numéricos necessários à avaliação dos sistemas têxteis flexíveis foi utilizado o software comercial LS-DYNA<sup>™</sup>, como referido anteriormente. O LS-DYNA<sup>™</sup>, desenvolvido pela *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC), é um *software* de cálculo que tem implementado, entre outros, o método dos elementos finitos com integração explícita e é utilizado para um vasto leque de aplicações, entre elas a indústria automóvel, aeroespacial, militar, *etc.*

### 6.1 Descrição geral

No sentido de avaliar o comportamento de sistemas têxteis flexíveis sob o impacto de uma faca, este trabalho baseia a sua componente numérica em alguns aspetos técnicos da norma NIJ-0115.00, nomeadamente a definição da geometria e das características do impactor. Nos testes de certificação de equipamentos de proteção, esta norma utiliza dois tipos de impactores: facas e espigão. Neste caso particular, e uma vez que o principal objetivo é avaliar o desempenho do sistema têxtil flexível e não a influência de geometria do impactor, os ensaios numéricos foram levados a cabo tendo em conta uma montagem esquemática onde a faca PSDB/S1/G, que tem o seu desenho técnico apresentado na Figura 2.10, é utilizada como impactor.

No entanto, a norma apresenta uma massa acoplada na parte posterior da faca, com o objetivo de dotar os impactos com determinada energia cinética. Esta massa consiste num componente de Nylon ao qual é fixada a faca e o seu suporte, como se mostra na Figura 6.1. Dentro do objeto de Nylon existem ainda dois discos de espuma de polietileno com o objetivo de reproduzir a dinâmica da mão aquando de um movimento real de facada. No entanto, dada a complexidade do processo de criação de malha e a não-influência da geometria deste componente nos resultados, optou-se por representar esta montagem real por um bloco com a mesma massa.

De forma genérica e em termos numéricos este trabalho centra-se na alteração da estrutura do alvo, pelo que, à semelhança do impactor, será detalhado convenientemente nos pontos seguintes. Na Figura 6.2 está representada a montagem esquemática da generalidade dos ensaios numéricos levados a cabo neste trabalho.

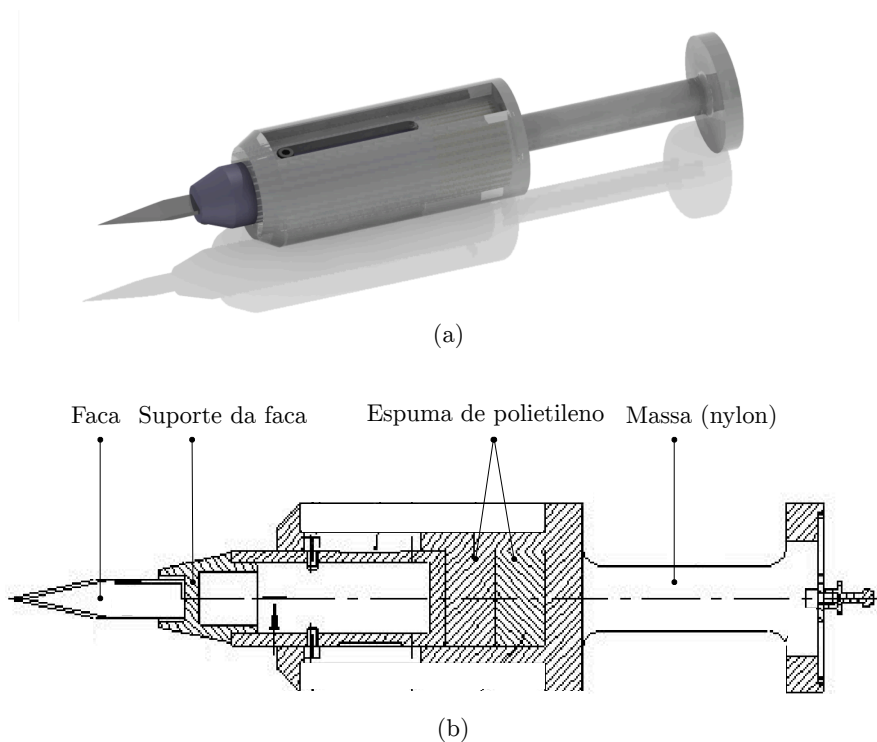


Figura 6.1: Representação tridimensional (a) e dos componentes internos (b) do impactor descrito na norma NIJ-0115.00 [27].

## 6.2 Modelo da massa de impacto

De forma a proceder à modelação de uma massa de impacto que represente a totalidade da montagem acoplada à faca, procedeu-se ao cálculo da massa de cada componente apresentado na Figura 6.1b. Na Tabela 6.1 apresenta-se a massa e o material de cada componente bem como a massa total da montagem.

Tabela 6.1: Propriedades dos componentes do impactor real conforme a norma NIJ-0115.00 [27].

Componente	Material	Massa [g]
Suporte da faca	Alumínio	650
Espuma de polietileno	Polietileno	3.98
Massa de impacto	Nylon	1250
Total	—	1903.98

Uma vez determinada a massa total da montagem acoplada à faca, e tendo em mente uma geometria simples, foi modelado um paralelepípedo com dimensões  $54 \times 36 \times 30$  [mm<sup>3</sup>]. Para a discretização da malha foram utilizados elementos sólidos hexaédricos de 8 nós. O modelo de elementos finitos é apresentado na Figura 6.3.

Uma vez que este componente serve única e exclusivamente para dotar o impactor com a massa referida na norma NIJ-0115.00, o modelo de comportamento do material que lhe é associado teve necessariamente que ser definido como rígido, uma vez que toda a energia

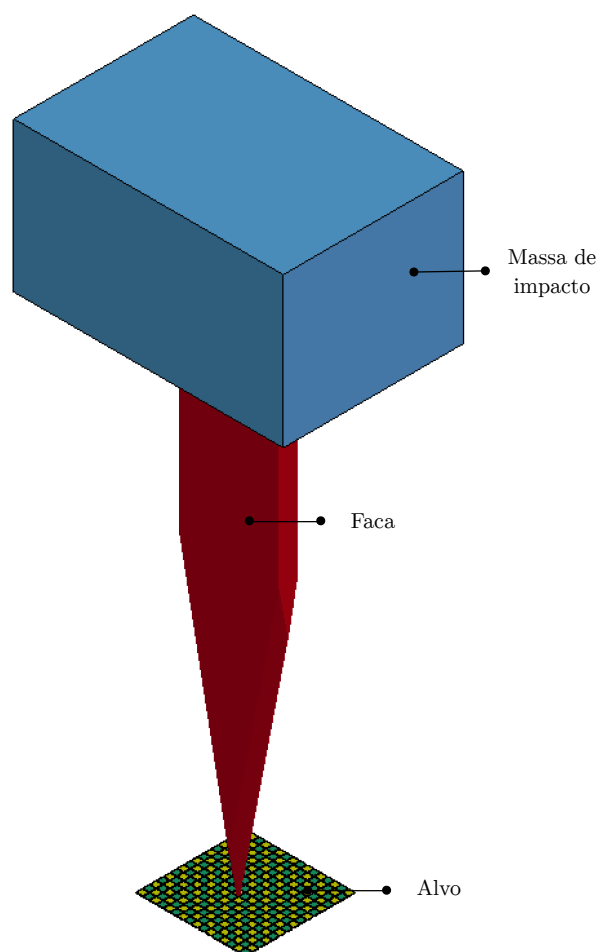


Figura 6.2: Representação esquemática do modelo geométrico utilizado neste trabalho.

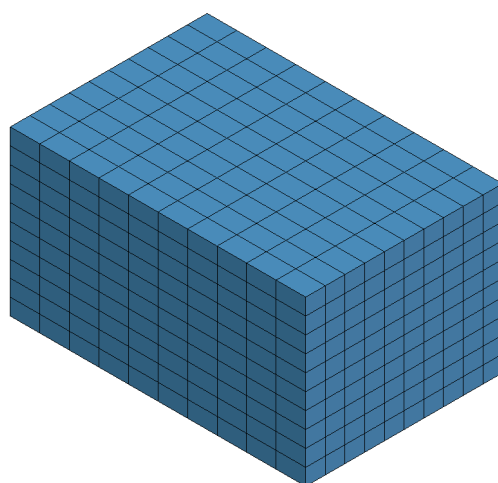


Figura 6.3: Modelo de elementos finitos da massa de impacto.

cinética associada ao seu movimento tem que ser transmitida para a zona de impacto e não pode ser dissipada pela sua deformação. Assim, o modelo de comportamento adotado no LS-DYNA<sup>™</sup> para este componente é o \*MAT\_RIGID. Este modelo de comportamento é caracterizado pelo facto das propriedades de inércia que lhe estão associadas serem calculadas com base na geometria do modelo e na sua densidade. Posto isto, por forma a ser calculado corretamente o valor da sua massa, é necessário definir uma densidade fictícia, tendo em conta o seu volume. Assim, uma vez que o volume do componente é de  $5.832 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  e tendo em conta que

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (6.1)$$

sendo  $m$  a massa,  $\rho$  a densidade e  $v$  o volume, então a a densidade fictícia para o componente deverá ser  $\rho = 3.264 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ . Ainda assim, este modelo de material necessita da introdução do valor do módulo de Young e coeficiente de Poisson, no sentido de calcular os parâmetros necessários à definição da interface de contacto entre este corpo e outros. Na Tabela 6.2 é apresentado um resumo das propriedades necessárias à correta definição do modelo de material deste componente.

Tabela 6.2: Propriedades do modelo de comportamento do material \*MAT\_RIGID.

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo de Young	210	GPa
Coefficiente de Poisson	0.3	—
Volume	$5.832 \times 10^{-5}$	$\text{m}^3$
Densidade	$3.264 \times 10^4$	$\text{kg/m}^3$
Massa	1.904	kg

### 6.3 Modelo da faca

O modelo geométrico da faca utilizada, reproduzindo a PSDB/S1/G apresentada na norma NIJ-0115.00, foi obtido através do *software* CATIA. A justificação para utilizar este *software* de desenvolvimento CAD deve-se ao facto do LS-DYNA<sup>™</sup> ter um leque de ferramentas de modelação limitado, não garantido a correta representação da faca.

Uma vez que o desenho técnico da norma NIJ-0115.00 não apresenta qualquer referência ao raio de curvatura da ponta e dos gumes cortantes, algumas aproximações tiveram que ser adotadas. Uma vez que arestas ou nós, ao serem definidos como parte de uma interface de contacto, podem dar origem a problemas numéricos pelo facto de darem origem a singularidades numéricas, a faca foi modelada recorrendo a um raio de concordância na ponta e nos gumes cortantes, com 0.4 e 0.3 mm, respetivamente.

Em boa verdade, a geometria real da faca tem um pequeno raio de concordância na sua ponta e gumes, como é possível observar na Figura 6.4. Este facto leva a que não seja cometida uma aproximação demasiado grosseira e desconexa da realidade, o que num impacto com utilização de facas como impactor poderia levar a resultados errados dada a influência que a geometria da ponta tem num processo físico destes, como demonstrado por Annaidh *et al.* [69]. Assim, após a criação da geometria no CATIA, realizou-se a

sua exportação no formato IGES (extensão .IGS) e a respetiva importação desse ficheiro para o LS-DYNA<sup>TM</sup>.

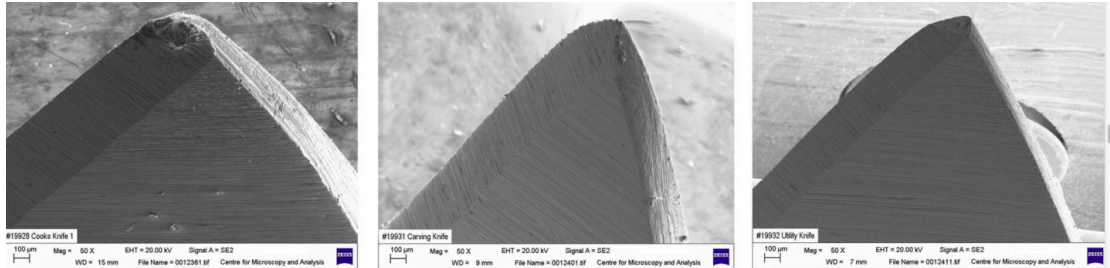


Figura 6.4: Ponta e gume de facas reais analisados ao microscópio ótico [69].

Para a discretização da geometria da faca foram utilizados elementos casca bidimensionais do tipo Belytschko-Tsay. Esta escolha, em detrimento dos elementos sólidos, justifica-se pelo facto de este ser um componente ao qual foi associado um modelo de comportamento de material rígido. Uma vez que não se pretende analisar as deformações na faca, os elementos casca associados a este modelo de comportamento do material revelam-se a melhor escolha face ao reduzido custo computacional que apresentam em relação aos elementos sólidos. Este modelo de comportamento do material requer a introdução dos seguintes parâmetros: densidade ( $\rho$ ), módulo de Young ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Uma vez que nada é dito acerca do material que é utilizado na norma NIJ-0115.00, optou-se por adotar um aço convencional, com uma densidade  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ , módulo de Young  $E = 210 \text{ GPa}$  e coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$ .

Através da representação da Figura 6.5 é ainda possível verificar que o modelo foi discretizado com elementos finitos mais pequenos na zona da ponta, de forma a representar convenientemente a geometria e não haver discrepância entre o tamanho médio destes elementos e o tamanho dos elementos do alvo, que será apresentado no ponto seguinte, de forma a evitar possíveis problemas numéricos.

## 6.4 Modelo do alvo

O comportamento de sistemas têxteis flexíveis tem sido estudado praticamente só do ponto de vista de impactos balísticos, como referido anteriormente. Nesse sentido, e sendo a modelação de um tecido sujeita a determinados procedimentos, quer para impactos balísticos quer para impactos de menor velocidade, como é o caso de facas e navalhas, é de todo o interesse realizar uma pequena revisão daquilo que está acessível na literatura. Assim, antes da realização de qualquer modelo numérico e mesmo antes da criação da geometria que lhe serve de base, assumiu-se como relevante a procura desses procedimentos com o objetivo de partir de algo que esteja validado por alguns autores.

### 6.4.1 Breve revisão bibliográfica

Os modelos numéricos propostos na literatura para a representação de tecidos, principalmente do tipo *plain weave* apresentam imensas variações entre eles, umas com mais complexidade do que outras. Numa perspetiva geral, as simplificações realizadas devem-

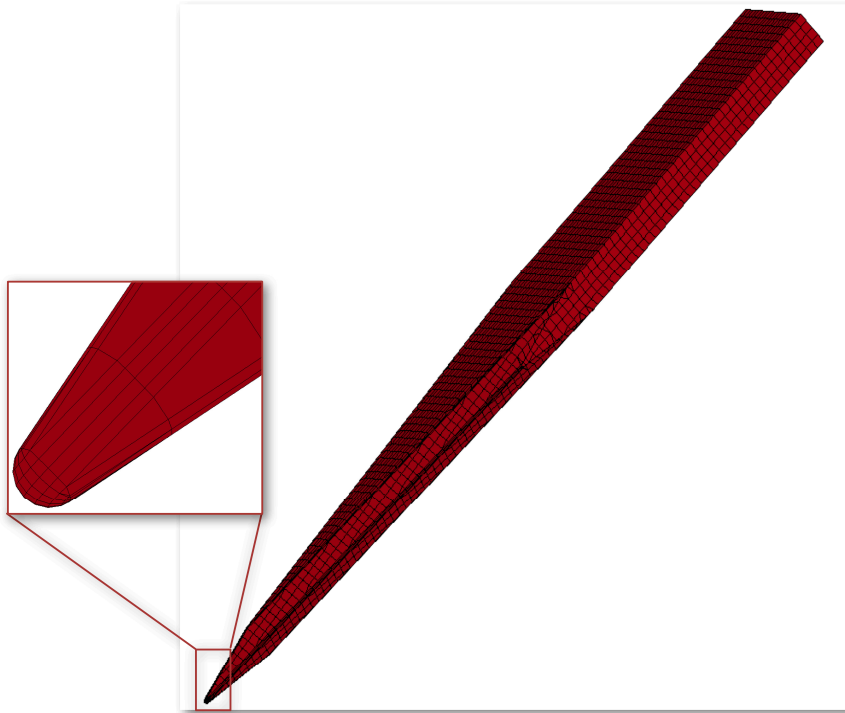


Figura 6.5: Modelo de elementos finitos da faca PSDB/S1/G.

-se tipicamente à necessidade de otimizar o tempo de simulação e o custo computacional associado [19].

Roylance e Wang [70], Billon e Robinson [71] e Shim *et al.* [72] desenvolveram modelos de tecido baseados em hastes unidimensionais interligadas por rótulas. Estes modelos tinham a capacidade de reproduzir o comportamento viscoelástico dos tecidos. Na Figura 6.6 é possível observar-se uma representação esquemática destes modelos.

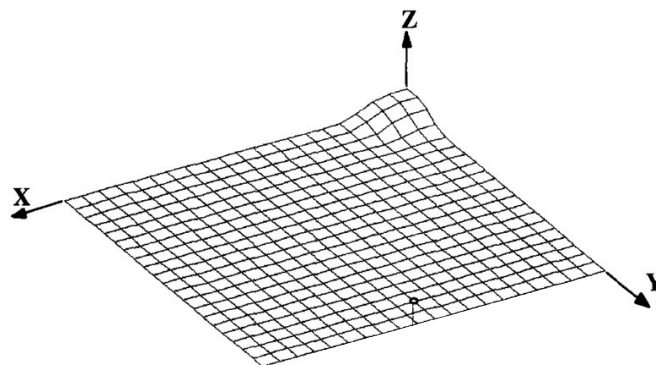


Figura 6.6: Representação esquemática do modelo numérico de um tecido com recurso a hastes unidimensionais [72].

No sentido de reproduzir de uma forma mais conveniente a estrutura dos tecidos, vários modelos baseados em elementos finitos foram desenvolvidos, representados através da utilização de elementos bidimensionais do tipo casca, e apresentados por Tabiei e Ivanov [73], Riedel *et al.* [74] e Lim *et al.* [75]. Este modelo apresentava-se como homogéneo, o que não permitia a avaliação do comportamento de cada *yarn* nem a definição de atrito entre os mesmos. Apenas era possível uma avaliação geral do comportamento do tecido como um todo.

Para colmatar a deficiência apresentada ao nível da avaliação do tecido à escala dos *yarns*, Shockey *et al.* [76] desenvolveram um modelo detalhado de elementos finitos sólidos no qual representava individualmente cada *yarn* do tecido, do tipo *plain weave*. Este modelo era capaz de definir contactos e representar o atrito nas interfaces entre os *yarns*, permitindo movimento relativo entre eles. Desde então, diversos estudos têm sido apresentados com recurso a este tipo de modelo, como é o caso dos trabalhos realizados por Duan *et al.* [19], Grujicic *et al.* [77], Lin *et al.* [78], Wang *et al.* [25], Talebi *et al.* [24] e Rao *et al.* [21].

De igual forma, neste trabalho foi criado um modelo tridimensional de elementos finitos sólidos para descrever cada *yarn* que, no conjunto global, formam um tecido do tipo *plain weave*. Nos pontos seguintes são descritas as técnicas, procedimentos e características associadas ao mesmo.

#### 6.4.2 Modelo do sistema têxtil flexível

Dada a complexidade geométrica de uma representação completa dos *yarns*, ponderou-se utilizar um *software* específico de modelação de tecidos, face a uma geometria de raiz realizada através de um *software* de modelação CAD. A escolha pela primeira opção foi evidente devido à forma como os programas dedicados estão otimizados para a produção da geometria dos *yarns*, sendo que, por outro lado, o *software* CAD permanece suscetível à perícia e aos modelos geométricos impostos pelo utilizador.

Por isto, para o desenvolvimento da célula representativa unitária utilizada neste trabalho foi utilizado o *software* TexGen. Este é um *software* de código aberto desenvolvido pela Universidade de Nottingham (Reino Unido) para a modelação geométrica de tecidos. O algoritmo de criação baseia-se na metodologia descrita na Secção 3.1.3.

As características geométricas do modelo *plain weave* requeridas pelo *software* são as seguintes:

- Número de *yarns* da série *warp*;
- Número de *yarns* da série *weft*;
- Espaçamento entre *yarns*;
- Largura dos *yarns*; e
- Espessura da camada de tecido.

Os requisitos acima descritos foram medidos diretamente numa amostra de Kevlar-29<sup>®</sup>, gentilmente cedida pela Royal Military Academy (Bélgica). Com as suas propriedades físicas e mecânicas descritas no Capítulo 3, o Kevlar-29<sup>®</sup> tem as suas características geométricas para construção de uma CRU descritas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Propriedades geométricas da célula representativa unitária de Kevlar-29<sup>®</sup>.

Propriedade	Valor	Unidades
Número de <i>warp yarns</i>	2	—
Número de <i>weft yarns</i>	2	—
Espaçamento entre <i>yarns</i>	0.2	mm
Largura dos <i>yarns</i>	1.17647	mm
Espessura do tecido	0.1	mm

Por forma a diminuir a fonte erro nas medições, e tendo estas sido feitas com recurso a um paquímetro, houve necessidade de medir uma área de interesse com dimensões consideráveis, dividindo depois pelo número de *yarns* dessa zona. Com os dados adquiridos foi então reproduzida uma célula representativa unitária e exportada do *software* no formato STEP (extensão .STP).

No seguimento, face às limitações do LS-DYNA<sup>™</sup> em termos de ferramentas de criação de malha, a única opção com elementos finitos sólidos resultou numa malha gerada automaticamente e de forma pouco regular. Com recurso ao *software* Abaqus<sup>®</sup>, que possui um leque mais abrangente de ferramentas de criação e edição de malhas, foi desenvolvida uma malha regular, composta por elementos sólidos hexaédricos de 8 nós e elementos sólidos do tipo cunha com 6 nós para representar o interior de cada *yarn* e as zonas próximas das arestas, respetivamente. A exportação do Abaqus<sup>®</sup> foi feita com recurso a um ficheiro com extensão .INP, nativa do *software*, com vista à importação direta no LS-DYNA<sup>™</sup>. Foram ainda realizadas oito repetições da célula representativa unitária em ambas as direções por forma a representar um tecido com  $16 \times 16$  *yarns*. O modelo numérico do tecido apresenta dimensões gerais de  $22 \times 22 \times 0.1$  [mm<sup>3</sup>]. Na Figura 6.7 é possível observar-se a malha gerada e utilizada ao longo das simulações realizadas neste trabalho.

De forma a representar o comportamento do material ao nível de cada *yarn* é necessário implementar um modelo de comportamento específico e que represente as particularidades de um tecido. No LS-DYNA, diversos modelos de material estão aptos a representar com fiabilidade este comportamento [79]. No entanto, os parâmetros necessários à definição de cada um deles apresentam diferenças entre si. A escolha recaiu necessariamente por um modelo de comportamento de material que fosse consagrado pela literatura, de onde seriam retirados os parâmetros que definem as características do material.

O modelo de comportamento utilizado foi o \*MAT\_ORTHOTROPIC\_ELASTIC [80]. Este modelo de material apresenta uma característica essencial à boa representação do comportamento dos tecidos: a distinção das propriedades em relação à orientação do referencial (anisotropia). Esta necessidade prende-se, como referido anteriormente, pelo facto de cada *yarn* apresentar propriedades distintas na direção longitudinal em comparação com as direções transversais. Existe, portanto, a necessidade de fazer distinção entre esta direção e as outras duas. Este modelo de comportamento apresenta uma relação tensão-deformação definida como

$$\varepsilon = C\sigma \quad (6.2)$$



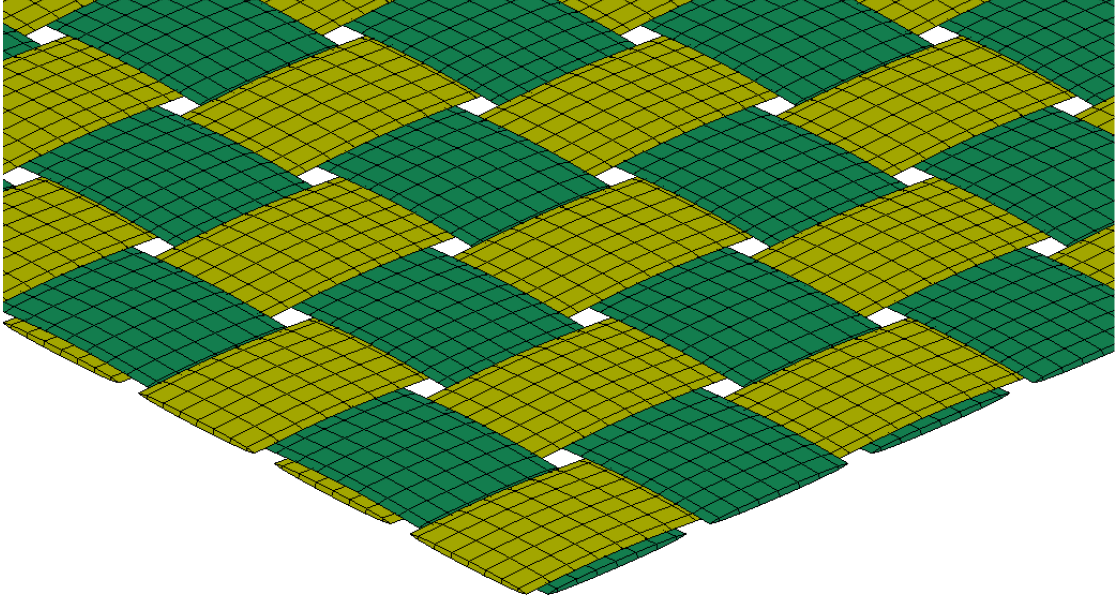


Figura 6.7: Modelo de elementos finitos do tecido de Kevlar-29<sup>®</sup>.

onde  $\boldsymbol{\varepsilon}$  é o vetor de deformações,  $\boldsymbol{\sigma}$  é o vetor de tensões e a matriz  $\mathbf{C}$  é baseada na relação

$$\mathbf{C} = \mathbf{T}^T \mathbf{C}_L \mathbf{T} \quad (6.3)$$

onde  $\mathbf{T}$  é a matriz de transformação e  $\mathbf{C}_L$  é a matriz constitutiva definida com base nas constantes do material nas direções  $Ox$ ,  $Oy$  e  $Oz$ . Para um material ortotrópico elástico, a matriz inversa de  $\mathbf{C}_L$  é definida como

$$\mathbf{C}_L^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_a} & -\frac{\nu_{ba}}{E_b} & -\frac{\nu_{ca}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{ab}}{E_a} & \frac{1}{E_b} & -\frac{\nu_{cb}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{ac}}{E_a} & -\frac{\nu_{bc}}{E_b} & \frac{1}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{bc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ca}} \end{bmatrix}$$

em que  $E_a$ ,  $E_b$  e  $E_c$  são os módulos de elasticidade nas direções  $Ox$ ,  $Oy$  e  $Oz$ , respetivamente, e  $\nu_{ba}$ ,  $\nu_{ca}$  e  $\nu_{cb}$  são os coeficientes de Poisson nos planos  $Oxy$ ,  $Oxz$  e  $Oyz$ , respetivamente.

Tendo em conta que o tecido possui os *yarns* a perfazerem um ângulo de  $90^\circ$ , a direção longitudinal dos mesmos ora está orientada segundo a direção  $Ox$ , ora segundo a direção  $Oy$ . Para a correta associação das propriedades, foram definidos dois tipos de material em que a única diferença entre eles é a troca direta das propriedades nas direções  $Ox$  e  $Oy$ , simulando assim a existência de referenciais locais. Na Tabela 6.4 são apresentadas as propriedades utilizadas para a correta formulação do modelo de material.

Tabela 6.4: Propriedades elásticas (GPa) do Kevlar-29<sup>®</sup>.

Direção	$E_a$	$E_b$	$E_c$	$\nu_{ba}$	$\nu_{ca}$	$\nu_{cb}$	$G_{ab}$	$G_{bc}$	$G_{ca}$
<i>Yarns</i> alinhados em $Ox$	70.3	1.406	1.406	0	0	0	1.406	1.406	1.406
<i>Yarns</i> alinhados em $Oy$	1.406	70.3	1.406	0	0	0	1.406	1.406	1.406

A densidade do Kevlar-29<sup>®</sup> é  $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$ , sendo que todas as propriedades do material foram baseadas nos trabalhos de Duan *et al.* [19], Gruzicic *et al.* [77], Talebi *et al.* [24] e Rao *et al.* [21].

### 6.4.3 Modelo da cortiça

Para a implementação da cortiça no alvo, foi desenvolvida uma geometria com dimensões  $22 \times 22 \times 1 \text{ [mm}^3\text{]}$ , por forma a representar uma placa. As dimensões foram definidas com base na necessidade de alinhar os bordos do tecido com os bordos da cortiça para uma posterior aplicação das condições de fronteira como um todo.

A geometria foi discretizada com base em elementos hexaédricos de 8 nós, sendo que a zona de impacto da faca foi refinada por forma a não haver discrepâncias entre o tamanho dos elementos da ponta da faca que iniciam o contacto e a placa-alvo. As zonas mais afastadas da zona de impacto foram discretizadas com elementos mais grosseiros, promovendo a redução do custo computacional da simulação. Ainda assim, foi também tido em conta a redução de tamanho dos elementos entre estas duas zonas, pelo que se teve um cuidado extra na aplicação de uma transição suave e progressiva do tamanho dos elementos finitos entre a zona refinada e a zona mais grosseira. Na Figura 6.8 é possível observar a geometria da placa de cortiça já discretizada.

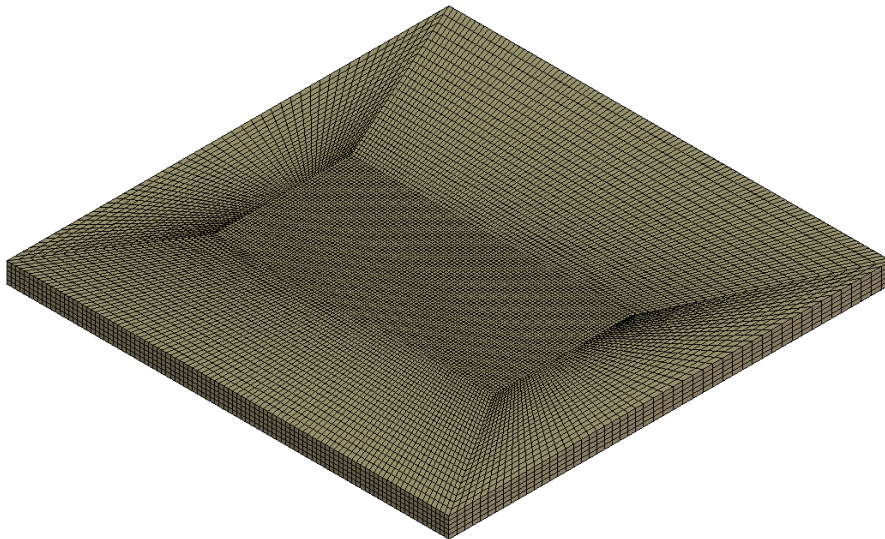


Figura 6.8: Discretização do modelo numérico da cortiça

Apesar do LS-DYNA<sup>®</sup> possuir vários modelos para a representação do seu comportamento, aquele que mais se adequa à caracterização do micro-aglomerado de cortiça é o \*MAT\_HONEYCOMB [80]. Uma das vantagens do uso deste modelo de comportamento é a possibilidade de definição detalhada da curva de tensão-deformação real para a representação do comportamento da cortiça. Com isto, os parâmetros requeridos por este algoritmo de cálculo são:

- Densidade,  $\rho$ ;
- Módulo de Young do material em regime de densificação,  $E_d$ ;
- Coeficiente de Poisson do material em estado densificado,  $\nu_d$ ;
- Módulos elásticos do material em regime expandido,  $E_{aaU}$   $E_{bbU}$   $E_{ccU}$ ;
- Curva tensão-deformação experimental; e
- Volume relativo em regime de densificação,  $V_f$ .

Este modelo de comportamento do material considera a cortiça como ortotrópica antes da sua densificação, pelo que apresenta de forma independente as componentes do tensor das tensões. Estas componentes são calculadas com base nas suas propriedades em regime de compressão inicial e em regime de densificação, uma vez que as propriedades elásticas variam linearmente em função do volume relativo<sup>1</sup>, e são expressas como:

$$\begin{aligned}
 E_{aa} &= E_{aaU} + \beta(E_d - E_{aaU}) \\
 E_{bb} &= E_{bbU} + \beta(E_d - E_{bbU}) \\
 E_{cc} &= E_{ccU} + \beta(E_d - E_{ccU}) \\
 G_{ab} &= E_{abu} + \beta(G_d - E_{abu}) \\
 G_{bc} &= E_{bcu} + \beta(G_d - E_{bcu}) \\
 G_{ca} &= E_{cau} + \beta(G_d - E_{cau})
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

onde  $E_d$  e  $G_d$  representam o módulo de Young e o módulo de corte em regime de total compactação, respetivamente,  $E_{xx}$  e  $G_{xx}$  representam a evolução das componentes do tensor das tensões ortotrópico em termos de módulo de Young e módulo de corte, respetivamente, e  $E_{xxU}$  e  $G_{xxU}$  representam o mesmo que estes últimos mas em regime expandido. A variável  $\beta$  é expressa por

$$\beta = \max \left\{ \min \left\{ \frac{1 - V}{1 - V_f}, 1 \right\}, 0 \right\} \tag{6.5}$$

em que  $V$  representa o volume relativo e  $V_f$  é o volume relativo em regime de densificação. Este modelo considera ainda que o coeficiente de Poisson do material é nulo, o que revela boa concordância com o facto deste tipo de material apresentar um coeficiente de Poisson relativamente baixo [52].

Como referido anteriormente, a cortiça é utilizada neste trabalho sob a forma de micro-aglomerado de cortiça NL20, pertencente à gama de produtos CORECORK<sup>®</sup>,

<sup>1</sup>O volume relativo  $V$  é definido como a razão entre o volume corrente e o volume inicial [80, 81].

produzidos pela Amorim Cork Composites. Na Tabela 6.5 são apresentadas as propriedades deste micro-aglomerado de cortiça, indispensáveis à sua caracterização no LS-DYNA<sup>™</sup>. Em termos de curva de tensão-deformação experimental, o conjunto de pontos  $(\varepsilon, \sigma)$  introduzidos no *software* estão representados sob forma gráfica na Figura 4.7.

Tabela 6.5: Propriedades elásticas (GPa) do Kevlar-29<sup>®</sup>.

Propriedade	Valor	Unidades
$\rho$	1440	kg/m <sup>3</sup>
$E_d$	9.0	GPa
$\nu$	0.3	—
$E_{aa} = E_{bb} = E_{cc}$	0.006	GPa
$V_f$	0.15	—

## 6.5 Condições de fronteira

Por forma a respeitar as condições de queda da faca e do impactor descritas na norma NIJ-0115.00, o modelo numérico da massa de impacto foi associado ao modelo numérico da faca através do constrangimento \*CONSTRAINED\_RIGID\_BODIES. Este tipo de constrangimento funciona como uma ligação rígida entre os dois corpos e baseia o cálculo das propriedades de inércia do conjunto numa combinação entre as propriedades dos corpos envolvidos nesta ligação [80, 81].

Por outro lado, para garantir apenas o movimento vertical do conjunto, provocado pela parede do tubo de queda exigido pela norma NIJ-0115.00, todos os graus de liberdade de translação e rotação da faca, à exceção da translação vertical, foram bloqueados.

Nos testes experimentais de acordo com a norma NIJ-0115.00, o impactor, que possui uma determinada massa, é colocado a uma altura do alvo previamente calculada de forma a originar um impacto com determinada energia, uma vez que o impactor está sujeito unicamente à ação da força gravítica. Nos casos numéricos apresentados neste trabalho, e de forma a reduzir o tempo de cálculo, este método foi alterado e baseou-se na colocação do impactor a uma distância bastante reduzida do alvo, de forma a apenas evitar o contacto inicial, e foi calculada a velocidade que produziria um impacto com a energia desejada. A definição da velocidade inicial será abordada com relativo detalhe mais à frente.

De forma a registar o comportamento do alvo sob impacto, foram bloqueados todos os graus de liberdade dos nós exteriores e posicionados ao longo da espessura do alvo, de forma a reproduzir um encastramento das arestas do alvo. Este método não representa a utilização do alvo real na íntegra. No entanto, os custos computacionais associados à sua total representação levariam a ensaios que não se revelam possíveis de realizar em tempo útil no âmbito deste trabalho.

## 6.6 Interfaces e contactos entre componentes

O desenvolvimento de modelos numéricos para representar um fenómeno real requer a definição de todas as propriedades físicas e mecânicas associadas aos componentes. Para

uma correta descrição do fenómeno em causa impera também a necessidade da definição da interação entre os diversos componentes modelados, uma vez que o LS-DYNA™ não reconhece as interfaces automaticamente. Para tal, o *software* dispõe de um conjunto de modelos de contacto na sua base de dados que devem ser ativados conforme a natureza do fenómeno em causa. A ativação dos contactos permite definir, entre outras coisas, o atrito existente na interface dos componentes.

Cada face de uma interface é designada por superfície mestre<sup>2</sup> e superfície escrava<sup>3</sup>. A superfície escrava é aquela que necessita de ser verificada em relação a possíveis penetrações por parte da outra superfície. Tipicamente, esta distinção é realizada através da identificação da superfície com maior energia mecânica, a superfície mestre, e da superfície que recebe parte dessa energia, a superfície escrava [80, 81].

No caso dos algoritmos presentes no LS-DYNA™, estes são processados em cada ciclo de cálculo e verificam as penetrações existentes na superfície escrava e aplicam uma força em sentido contrário de forma a resistir à penetração, iniciando a deformação do corpo [80, 81].

Para uma completa definição da interface *faca-yarns* foi utilizado o contacto do tipo \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE. Este tipo de contacto, por ser automático, não necessita de antecipar a orientação das superfícies aquando da interação. Esta característica é extremamente útil quando os modelos numéricos estão sujeitos a grandes deformações. Nesta interface, a faca foi definida como superfície mestre, enquanto que cada *yarn* foi definido como superfície escrava. Para tal, ao invés da realização de um contacto específico entre a faca e cada *yarn* individual, optou-se pelo agrupamento de todos os *yarns* e pela designação desse conjunto como superfície escrava, reduzindo os contactos definidos a apenas um.

No que toca à definição das interfaces *yarn-yarn*, inicialmente foi definido o contacto do tipo \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE. No entanto, dado o elevado número de *yarns* utilizados, um enorme número de contactos teriam que ser definidos, pelo que se optou por trocar o tipo de contacto para \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE. Este tipo de contacto é amplamente utilizado em simulações com impactos em automóveis, dada a grande quantidade de componentes envolvidos. Este contacto permite ainda que seja definido unicamente a superfície escrava e permite a interação entre todos os componentes, mesmo até entre um componente e ele próprio. Com isto, e uma vez que as interfaces são tratadas de forma numericamente semelhante, a alteração do tipo de contacto não interfere nos resultados obtidos, reduzindo assim a quantidade de interfaces a definir.

## 6.7 Modelação de dano na cortiça

Dado o impacto a que a cortiça está sujeita, torna-se relevante uma representação numérica da eventual rotura deste material. Deste modo, e uma vez que os mecanismos de rotura da cortiça são complexos, impera a necessidade de representar este processo físico através de uma abordagem que, ao nível numérico, não seja incoerente com aquilo que se verifica na realidade. Quando sujeito ao impacto de uma faca, o material pode atingir a sua tensão de rotura e iniciar o desenvolvimento e propagação de uma fenda.

---

<sup>2</sup>Do inglês *master side*.

<sup>3</sup>Do inglês *slave side*.

Na ausência de não-linearidades, existem algumas técnicas de previsão da propagação de fendas, como o integral-J ou a teoria de Griffith [82]. No entanto, estes métodos não podem ser utilizados para uma previsão da iniciação da rotura e estão restritos a problemas onde a posição inicial da fenda é conhecida previamente [83]. Assim, alguns autores utilizam abordagens que representam uma caracterização do comportamento do material aquando da rotura não tão desconexa daquilo que experimentalmente é observado. Estas abordagens passam pela utilização de nós duplicados e/ou erosão nos elementos e interfaces coesivas [84].

A primeira abordagem consiste na duplicação dos nós dos elementos que previsivelmente estão dentro da área de influência do impacto e pela definição de um critério de separação destes nós. No LS-DYNA™ esta metodologia passa pela utilização da ferramenta `*TIED_NODES_FAILURE`, que permite a seleção de uma região de interesse e a escolha de um valor de deformação de rotura como critério de separação. Este método, apesar de interessante em algumas aplicações, é ainda pouco utilizado face aos outros dois. O resultado numérico da duplicação e separação dos nós está representado esquematicamente na Figura 6.9.

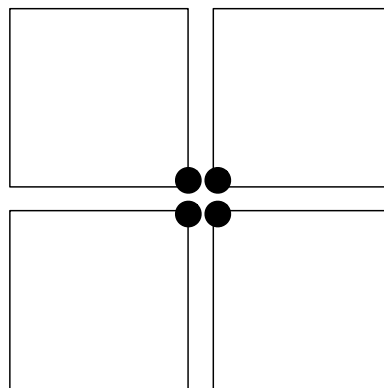


Figura 6.9: Representação esquemática da técnica de duplicação e separação de nós.

Por outro lado, a definição de erosão nos elementos permite que os elementos que apresentem  $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{\max}$  ou  $\sigma_1 \geq \sigma_{\max}$  sejam eliminados permanentemente do cálculo, onde  $\varepsilon_1$  e  $\sigma_1$  representam a deformação e tensão máxima principais, respetivamente, e onde  $\varepsilon_{\max}$  e  $\sigma_{\max}$  representam a deformação e tensão principais à rotura, respetivamente. Tal origina a criação de lacunas na malha e a sua propagação aos elementos vizinhos [81]. Para a correta definição desta abordagem, é necessário definir o modelo de material em termos de deformação normal à rotura e deformação de corte à rotura,  $\varepsilon_r$  e  $\gamma_r$ , respetivamente [81]. Assim, e no caso do MAC NL20, estes parâmetros assumem os valores  $\varepsilon_r = 0.8$  e  $\gamma_r = 0.25$ , respetivamente [58].

Por fim, na abordagem que faz uso de interfaces coesivas, ao invés da fenda se propagar tendo em conta a malha de elementos finitos e a distribuição de tensões e deformações resultante do impacto, a fenda está previamente posicionada no modelo geométrico. Frequentemente utilizada para modelar delaminagens em materiais compósitos, esta técnica pode também ser utilizada para a modelação de abertura de fendas. Assim, a sua definição passa pela implementação de uma junção de dois componentes topo-a-topo (que passa pela divisão da placa de cortiça em duas partes) e pela definição de um contacto do tipo `*TIEBREAK`, nomeadamente o `*CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SUR`

FACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK, que baseia o seu algoritmo no conhecimento das propriedades do material em termos da sua resistência à tração e ao corte. Com este conhecimento, este tipo de contacto implementa uma constante monitorização da distribuição de tensões nos nós da interface e acopla os nós coincidentes até o critério de separação, definido pela relação

$$\left(\frac{|\sigma|}{\sigma_f}\right)^2 + \left(\frac{|\tau|}{\tau_f}\right)^2 \geq 1 \quad (6.6)$$

ser atingido, onde  $\sigma$  e  $\tau$  representam a tensão normal e de corte do incremento de tempo em que é feita a monitorização e  $\sigma_f$  e  $\tau_f$  representam as resistências normal e de corte definidas na interface de junção [85]. Para o micro-aglomerado de cortiça NL20, os valores utilizados para os parâmetros  $\sigma_f$  e  $\tau_f$  foram, respetivamente, 0.16 MPa e 0.05 MPa. Estes valores resultam de um pressuposto adotado na medida em que se aproximou a tensão a que a cortiça está sujeita no início da região de densificação igual à sua tensão de fratura à tração.

A primeira abordagem, uma vez que duplica todos os nós de uma zona predefinida, deixa que, quando todos os nós de cada elemento atingem determinada tensão, o elemento se solte do componente. Esta consequência numérica não representa da melhor maneira o processo físico em questão, pelo que foi excluída. Por outro lado, a segunda abordagem, em que são eliminados do cálculo os elementos que atinjam determinada tensão ou deformação limite, permite a criação de lacunas, eliminando zonas da geometria do componente, pelo que se considerou não ser a melhor opção para este trabalho. Assim, e percebendo que a última abordagem descrita se enquadra melhor na representação do processo físico, foi adotado este método pela forma como representa o início e propagação de uma fenda.

## 6.8 Breve resumo dos modelos numéricos

No seguimento da descrição dos modelos numéricos desenvolvidos para este trabalho, revela-se de todo o interesse um resumo de todas as informações relevantes para a sua total descrição. Na Tabela 6.6 são apresentados os dados referidos.

Mais ainda, o método de integração temporal levado a cabo para os elementos finitos sólidos presentes nas simulações efetuadas foi a quadratura de Gauss com um ponto de integração (integração reduzida). Este tipo de integração no volume do elemento reduz as coordenadas de integração dos vértices às coordenadas do centro geométrico do mesmo. Com esta abordagem, o tempo computacional necessário para efetuar uma simulação é substancialmente reduzido. No entanto, a utilização de integração reduzida em conjunto com a utilização de parâmetros de comportamento com valores iguais ou próximos de zero pode conduzir a instabilidades numéricas [86]. Estas instabilidades resultam nos chamados modos de energia zero, ou *hourglass modes*. Este fenómeno é apenas numérico e pode induzir uma distorção exagerada nos elementos [81]. Para o controlo desta instabilidade numérica, o LS-DYNA<sup>TM</sup> possui vários algoritmos que inibem este modo de energia zero, pelo que a sua ativação foi efetuada como forma de prevenção às distorções exageradas dos elementos finitos.

Tabela 6.6: Resumo das propriedades numéricas dos modelos desenvolvidos.

<b>Componente</b>	<b>Modelo de material</b>	<b>Elementos</b>	<b>Nós</b>	<b>Tipo de elemento</b>
Massa de impacto	*MAT_RIGID	1000	1331	Hexaédrico
Faca	*MAT_RIGID	4804	4696	Belytschko-Tsai
Kevlar-29 <sup>®</sup>	*MAT_ORTHOTROPIC _ELASTIC	172032	347136	Hex/Cunha
Cortiça	*MAT_HONEYCOMB			Hexaédricos



Parte III

Resultados e Discussão



## Capítulo 7

# Estudos paramétricos

No seguimento da modelação completa dos ensaios numéricos realizada no *software* LS-DYNA™, foram realizados diversos estudos paramétricos. Nos pontos seguintes serão detalhados os ensaios, nomeadamente as suas características ao nível da configuração do alvo.

### 7.1 Validação do modelo numérico

Antes da realização de qualquer ensaio numérico tornou-se necessário realizar um estudo preliminar simples no sentido de perceber se os modelos realizados foram bem caracterizados e se o seu comportamento não apresenta nenhuma característica estranha e desconexa daquilo que seria de esperar. Tendo isto como mote, foram simulados dois impactos de uma esfera no modelo numérico do tecido para perceber se as interações entre os *yarns* funcionavam corretamente. Para isto, a esfera foi modelada como rígida e com um diâmetro de 4 mm. O material que lhe foi associado foi um aço corrente com módulo de Young  $E = 210$  GPa, coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$  e densidade  $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup>.

Como distinção dos dois impactos referidos apresenta-se a velocidade de impacto, como forma de variar a energia cinética de modo a perceber o comportamento do tecido num impacto com perfuração total e noutro em que tal não ocorresse. Por conseguinte, para o primeiro caso foi definida uma velocidade de 20 m/s e para o segundo esta variável foi definida como 100 m/s.

O primeiro ensaio, em que a sua sequência é possível observar na Figura 7.1, apresenta um comportamento expectável dos *yarns*, uma vez que existe movimento relativo entre eles, não existe penetração entre os mesmos e as condições de fronteira aparentam estar bem modeladas. Por outro lado, e uma vez que a velocidade da esfera não é suficientemente grande para perfurar o tecido, a elasticidade do mesmo retorna a esfera no sentido oposto ao seu movimento inicial. Daqui se conclui também que o comportamento do material se adequa às necessidades da simulação.

Assim, e no sentido de levar ao extremo a interação entre a esfera e o alvo, foi, como referido anteriormente, aumentada a velocidade da esfera para 100 m/s. A sequência deste ensaio está apresentada na Figura 7.2 onde é possível verificar que os *yarns* apresentam o mesmo comportamento, à exceção de que o movimento da esfera continua no sentido descendente e força-os a abrir um espaço para a sua passagem. Com isto, o tecido recua devido à energia elástica acumulada durante o impacto da esfera e mantém-se com

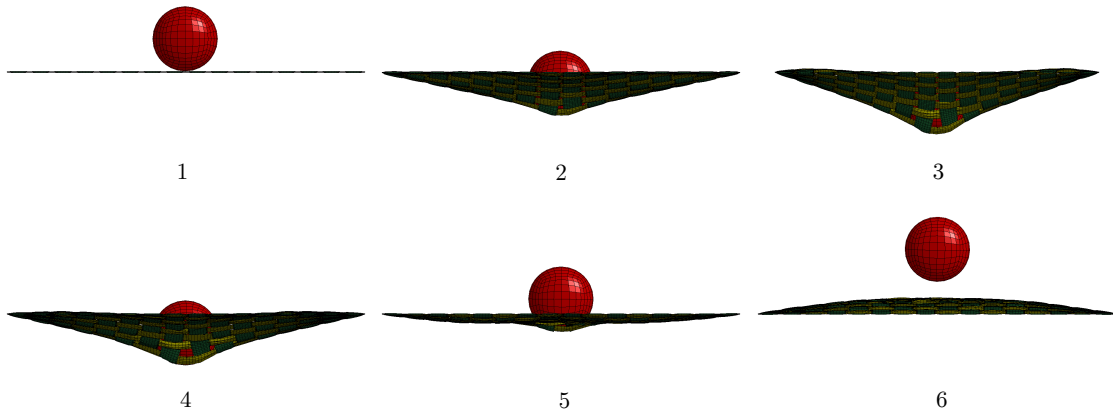


Figura 7.1: Sequência do ensaio de validação do tecido com impacto de uma esfera com velocidade  $v_z = 20$  m/s.

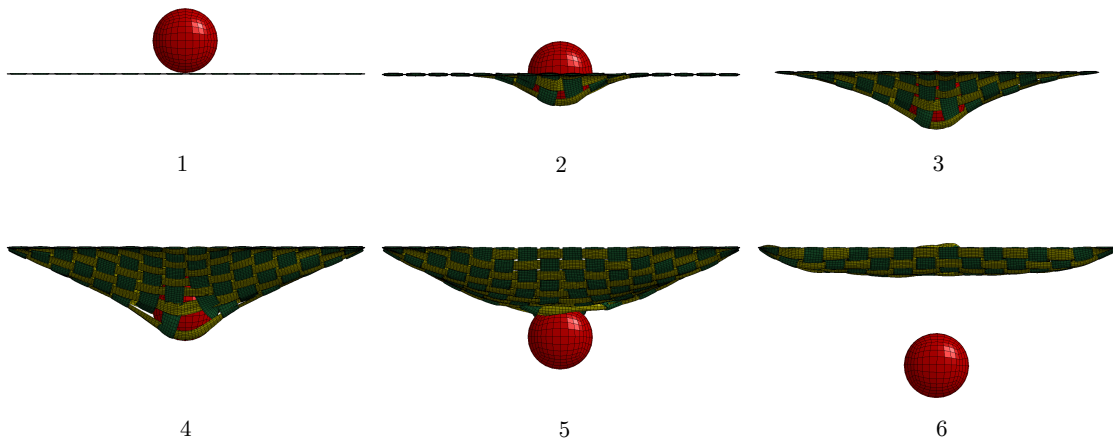


Figura 7.2: Sequência do ensaio de validação do tecido com impacto de uma esfera com velocidade  $v_z = 100$  m/s.

um movimento oscilatório devido à propagação das ondas elásticas entre o centro e as fronteiras.

Em suma, estes dois ensaios numéricos serviram para concluir que as interações entre o alvo e impactor, condições de fronteira e especialmente as interações entre as partes constituintes do alvo foram bem definidas e existe uma garantia que ensaios mais complexos não terão problemas nesta matéria. Mais ainda, serviram sobretudo para perceber o custo computacional que um ensaio numérico deste tipo tem associado. Neste caso, e apesar da geometria simples, as simulações apresentam um tempo de cálculo de largas dezenas de horas, devido ao elevado número de graus de liberdade e ao reduzido incremento de tempo (*timestep*).

Desta forma, no ponto seguinte será apresentada a técnica adotada para diminuir os tempos de simulação de modo a que seja possível realizar os estudos em tempo útil.

## 7.2 Controlo do incremento de tempo

Como referido anteriormente, os tempos de simulação exigidos por um sistema deste tipo podem atingir as centenas de horas. Uma vez que não se torna viável reduzir a dimensão do problema e muito menos adotar simplificações a este nível, a opção tomada seguiu o caminho de otimizar o incremento de tempo dos ensaios.

Por defeito, o método que o LS-DYNA<sup>™</sup> utiliza para o cálculo do incremento de tempo faz uso da expressão

$$\Delta t^{n+1} = \alpha \min\{\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_N\} \quad (7.1)$$

onde  $N$  é o número de elementos de todo o modelo e  $\alpha$  é um fator de escala, para calcular o incremento de tempo crítico e utilizá-lo depois como referência para todo o ensaio. Com este método, a existência de um elemento crítico pode levar à definição de um incremento de tempo reduzido para todo o modelo.

Assim, o LS-DYNA<sup>™</sup> prevê um método designado por *mass scaling*, que permite que o incremento de tempo seja definido manualmente pelo utilizador. No entanto, o método de integração explícita mantém-se estável apenas se o incremento de tempo utilizado for menor que o incremento de tempo crítico do ensaio global e, como visto anteriormente, ele já é utilizado por defeito pelo *software*. Assim sendo, este método recorre à adição de massa virtual no sistema por forma a aumentar a inércia do conjunto e consequentemente o incremento de tempo. Por vezes, com a existência de elementos críticos na malha, a adição de uma pequena massa virtual nesse elemento é suficiente para aumentar este valor bastante, contribuindo para uma redução do tempo computacional e garantindo a estabilidade do cálculo sem afetar significativamente os resultados. No entanto, consoante o incremento de tempo definido pelo utilizador, a massa virtual a ser adicionada ao sistema poderá ter que ser tal que altere completamente o comportamento dinâmico do sistema em estudo.

A definição do valor do incremento de tempo é feita através da definição do parâmetro  $\Delta t_{ms}$  no controlo \*CONTROL\_TIMESTEP. O novo valor do incremento de tempo é definido através da expressão

$$\Delta t = \alpha \Delta t_{ms} \quad (7.2)$$

Para termo de comparação foram realizados dois ensaios com duas camadas de tecido sob o impacto da faca, de acordo com a montagem da Figura 6.2, com a técnica de *mass scaling* ativa no primeiro e com o incremento de tempo padrão no segundo. As diferenças em termos de eficiência de tempo foram evidentes e são apresentadas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Comparação dos métodos de cálculo do *timestep*.

Método	$\Delta t$ [ms]	Tempo [ms]	Tempo CPU [min]
Padrão	$2.79 \times 10^{-6}$	15.5	12361
<i>Mass scaling</i>	$9 \times 10^{-5}$	15.5	408

Desta forma, e uma vez que não surgiram complicações numéricas nos ensaios, o novo incremento de tempo será utilizado em todas as simulações realizadas daqui em diante.

### 7.3 Coeficiente de atrito

O coeficiente de atrito entre *yarns* e entre a faca e os *yarns* é um parâmetro cuja influência num impacto em sistemas têxteis flexíveis está muito pouco estudado na literatura. Esta limitação em termos bibliográficos torna-se um impedimento à correta descrição do sistema. Impera assim a necessidade de realizar um estudo que promova a avaliação do efeito da alteração do coeficiente de atrito de forma a adotar um valor padrão para os restantes estudos presentes neste trabalho.

A realização desta avaliação baseou-se no impacto da faca numa única camada de Kevlar-29<sup>®</sup>, utilizando uma velocidade de 2 m/s e uma densidade da massa de impacto cerca de 24 vezes menor que a descrita na norma NIJ-0115.00. Esta adaptação da energia de impacto realizou-se devido a problemas numéricos associados a grandes distorções que uma camada de tecido simples sofria. De notar que esta adoção foi feita pelo facto de que nesta gama de energias o coeficiente de atrito não é influenciado pela alteração da pressão de contacto provocada pela energia cinética e inércia do problema.

Foram realizados ensaios com o coeficiente de atrito igual para os dois pares de contacto referidos anteriormente e com valores fixados em 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 e 0.6. Destes ensaios foi avaliado o comportamento do tecido, a redução de velocidade da faca e os problemas numéricos que surgiram. Na Figura 7.3 encontram-se as curvas da velocidade da faca em função do tempo para os diversos coeficientes de atrito.

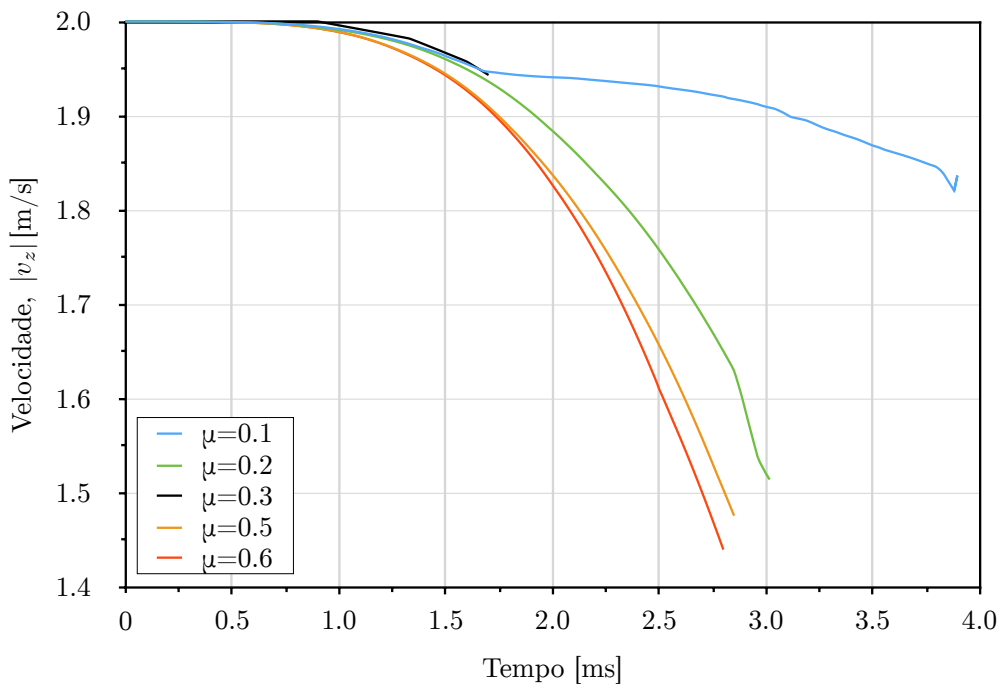


Figura 7.3: Velocidade da faca em função do tempo de ensaio, com variação do coeficiente de atrito entre *yarns* e faca-*yarns*.

Nas cinco simulações realizadas nesta avaliação, provavelmente devido à não - existência de um critério de rotura do material associada ao facto de existir apenas uma camada de tecido em estudo, o *software* não conseguiu terminar o ensaio devido à estagnação do

cálculo num determinado incremento. Este incremento varia de ensaio para ensaio. Na Figura 7.4 é possível observar-se o estado de cada ensaio no momento da estagnação de cálculo, que corresponde ao final de cada curva.

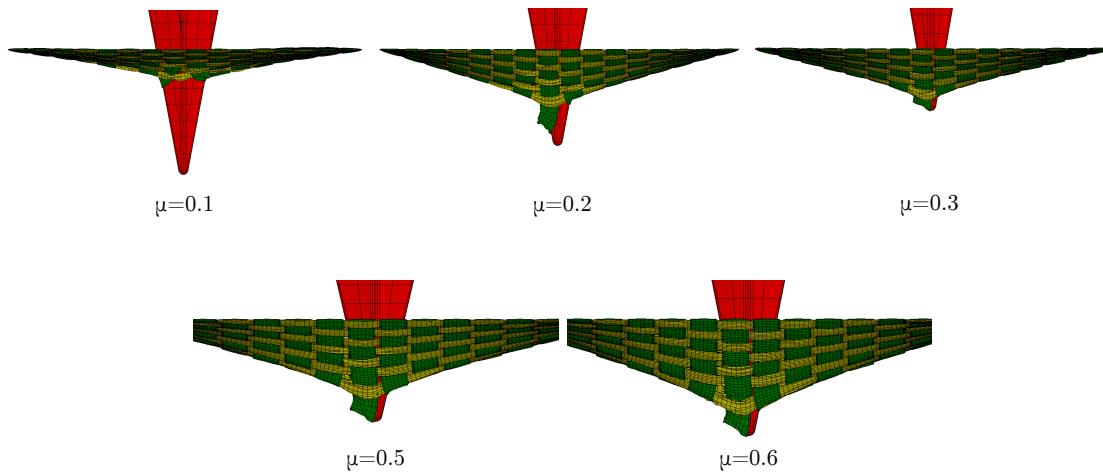


Figura 7.4: Comparação dos resultados obtidos para cada coeficiente de atrito, em termos de escorregamento do tecido pela faca, para o instante final de cada ensaio.

Com isto, é possível verificar, como esperado, que o coeficiente de atrito tem influência direta na redução de velocidade da faca, uma vez que aumenta as forças de contacto e dificulta o escorregamento dos *yarns*, como representado através do aumento de declive final dos perfis de velocidade presentes na Figura 7.3. No entanto, os valores de coeficiente de atrito são também responsáveis pela estagnação do cálculo, como já referido. Isto leva a concluir que valores demasiado elevados podem conduzir a forças de contacto excessivas e que não representam o fenómeno físico corretamente.

Avaliando o momento em que os cálculos estagnam é possível verificar que apenas com um coeficiente de atrito  $\mu = 0.1$  é possível uma correta representação de um ensaio deste tipo, com os *yarns* a terem liberdade suficiente para escorregar pela faca e permitirem a subida do tecido. Esta subida, além de caracterizada na Figura 7.4, é também notória na mudança de declive do perfil de velocidade correspondente, por volta dos 1.65 ms, que representa essa subida do tecido e conseqüente diminuição da taxa de redução de velocidade devido à eliminação do bloqueio da ponta da faca e à dissipação de energia passar a ser feita apenas pelo atrito inerente ao escorregamento. Por conseguinte, foi assumido como pressuposto um coeficiente de atrito  $\mu = 0.1$  para a interface *yarn-yarn* e *faca-yarn* para os estudos apresentados neste documento.

## 7.4 Otimização da energia de impacto

Dada a complexidade que seria necessária impor ao modelo numérico a fim de representar corretamente um ensaio regido pela norma NIJ-0115.00, os tempos de cálculo resultantes de uma simulação com tais características atingiriam valores incomportáveis à realização deste trabalho. Neste sentido, tendo em conta a representação do fenómeno físico em causa, e uma vez que o modelo de elementos finitos apresentado anteriormente segue uma linha simplificadora, torna-se necessário ajustar a energia de impacto à realidade da

simulação, por forma a minimizar fontes de erro derivadas do cálculo numérico.

A norma NIJ-0115.00 prevê uma energia de impacto de 24 J para o nível de energia mais baixo, correspondente à energia produzida pela massa referida na Secção 6.2, com uma velocidade de 5.02 m/s. No entanto este é um valor que se prevê, à partida, ser elevado face ao tipo de alvo a analisar. Dado este facto, foi necessário proceder a um ensaio preliminar no sentido de perceber se surgiriam complicações numéricas face à energia de impacto.

Para tal, foi realizado um ensaio semelhante ao descrito no estudo relativo ao atrito, mas com a introdução de mais uma camada de tecido. Foi, portanto, realizada a simulação do impacto da faca, com uma velocidade de 2 m/s e uma massa 24 vezes menor do que a estabelecida pela norma, num alvo composto por duas camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>. Em termos energéticos, este ensaio representa um impacto de 0.16 J. No entanto, e após o cálculo numérico, esta energia de impacto revela-se ainda elevada tendo em conta o alvo utilizado, uma vez que o cálculo terminou devido à distorção excessiva de um elemento. Na Figura 7.5 é possível observar o resultado deste fenómeno numérico.

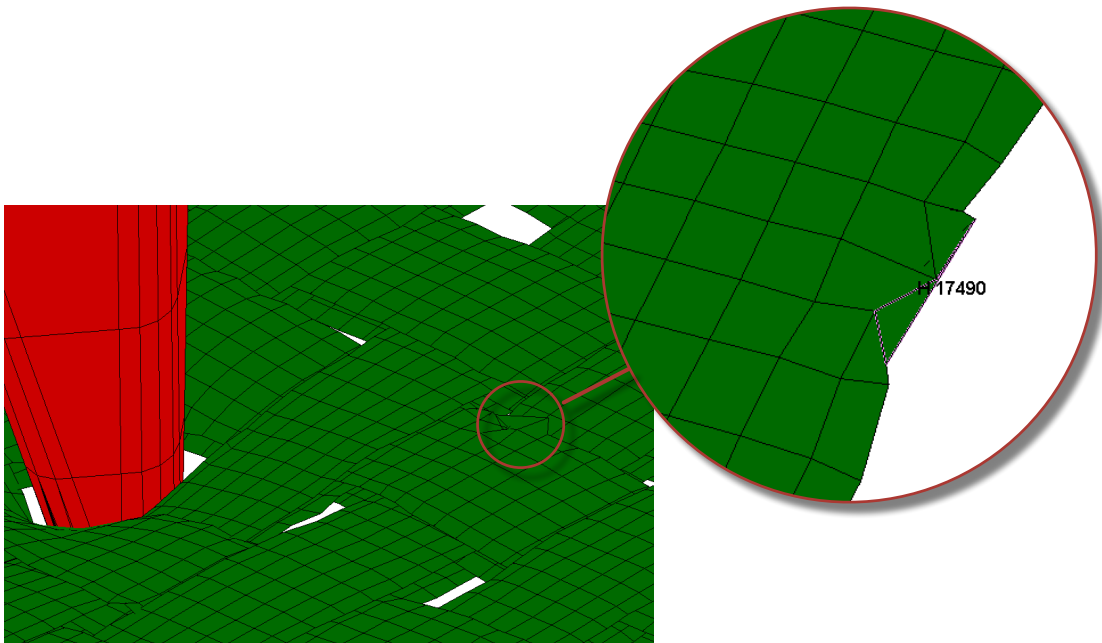


Figura 7.5: Representação da distorção excessiva de um elemento como resultado de instabilidades numéricas.

Neste sentido, foi realizado novo ensaio com as mesmas características, à exceção da velocidade que foi reduzida para 0.1 m/s, resultando num impacto com 0.4 mJ. Neste caso todo o ensaio correu sem complicações numéricas, pelo que se aceitou o pressuposto de que os restantes estudos realizados neste trabalho fossem definidos com a mesma velocidade de impacto e massa do impactor, aceitando esta energia como energia padrão para este trabalho. Na Figura 7.6 é possível observar a sequência de impacto deste último ensaio.



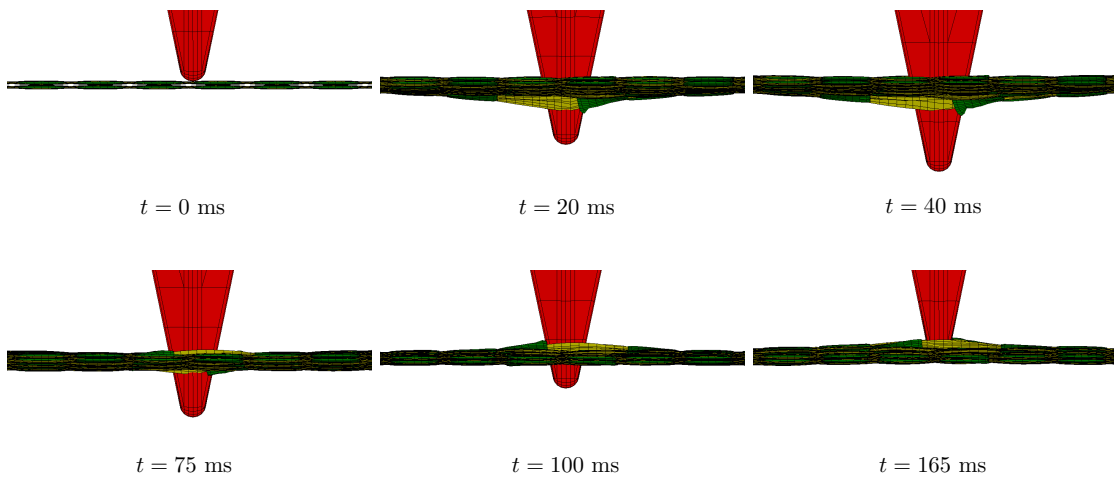


Figura 7.6: Sequência de impacto do ensaio de seleção da energia de impacto padrão.

## 7.5 Influência do número de camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>

Após os estudos realizados no sentido de efetuar algumas considerações a adotar nos estudos paramétricos de avaliação do desempenho de sistemas têxteis flexíveis, impera a necessidade de levar a cabo essa avaliação. Como referido anteriormente, os estudos desenvolvidos no âmbito deste trabalho centram-se na avaliação do alvo, sendo que a alteração dos materiais que o compõem bem como a sua configuração revelam-se o foco destes estudos.

Como primeira abordagem, e sendo que grande parte dos equipamentos de proteção pessoal de torso são constituídos apenas por Kevlar<sup>®</sup>, considera-se importante a realização de um estudo ao nível dos efeitos do impacto de uma faca num alvo com variação do número de camadas de tecido deste material. Nos pontos seguintes são detalhados os ensaios a este nível com distinção no alinhamento de camadas consecutivas: alinhadas e não-alinhadas.

### 7.5.1 Camadas alinhadas

A realização deste estudo teve como base de referência a utilização de um alvo com duas camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>, nas mesmas condições que foram selecionadas na Secção 7.6. Foram portanto realizadas simulações com quantidades superiores e inferiores de camadas de tecido face à referência, nomeadamente 1, 3, 4, 5, 6 e 8 camadas. Na Figura 7.7 é possível observar uma configuração típica do alvo utilizada neste estudo. O ponto de impacto da faca no tecido é o que se observa na Figura 7.8.

Para a análise dos efeitos desta variação foram, numa primeira fase, analisados os resultados em termos da velocidade da faca ao longo do ensaio. A Figura 7.9 apresenta o perfil de velocidade para cada ensaio. Este estudo revela uma tendência notória para o aumento do declive das curvas com o aumento do número de camadas, o que se traduz numa inversão no sentido de movimento da faca cada vez mais rápida. Em todos os ensaios realizados nesta secção se verificou esta inversão, visível na Figura 7.9 através do cruzamento dos perfis de velocidade na ordenada zero. Esta inversão de sentido deve-se

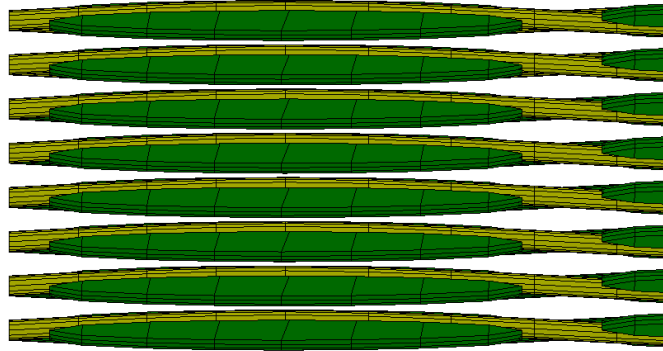


Figura 7.7: Representação da configuração do alvo utilizada no estudo com 8 camadas de tecido alinhadas.

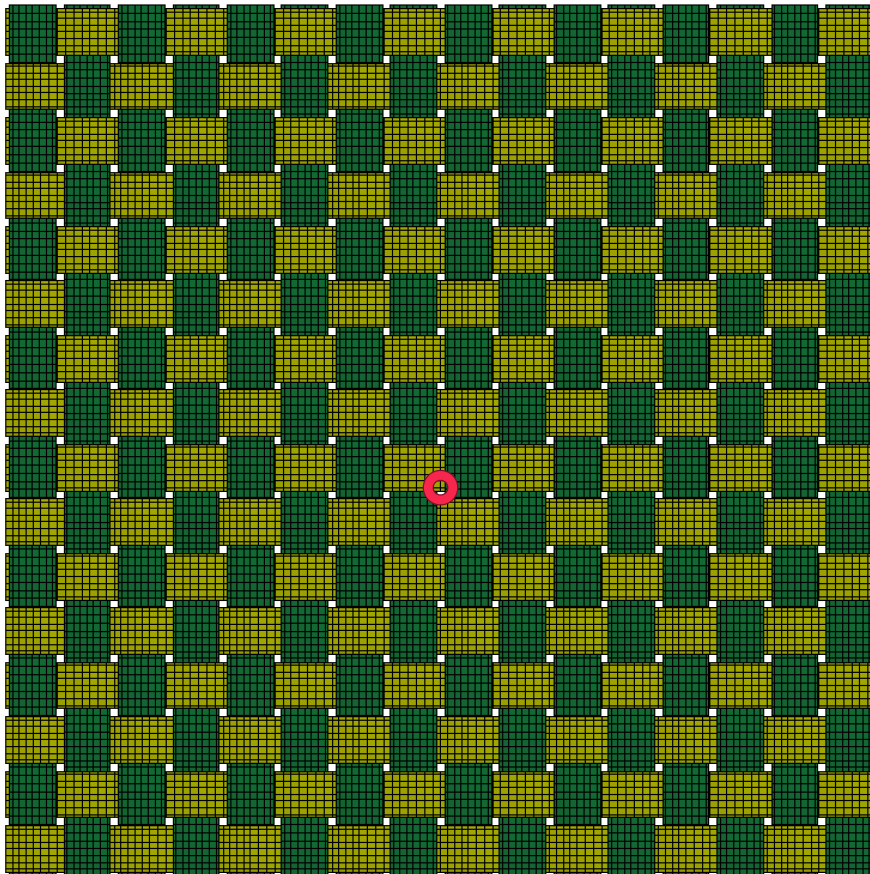


Figura 7.8: Ponto de impacto da faca no tecido.

à acumulação de energia elástica nos *yarns*. Assim, após a perda de energia cinética da faca, tendo em conta a energia perdida por atrito e a acumulação da restante energia no tecido sob a forma de energia elástica, o tecido cede novamente essa energia e imprime velocidade em sentido contrário à faca.

Por outro lado, o estudo da penetração da faca no alvo apresenta-se como um ponto com relativo interesse a estudar, dado ser um parâmetro que é utilizado em normas de

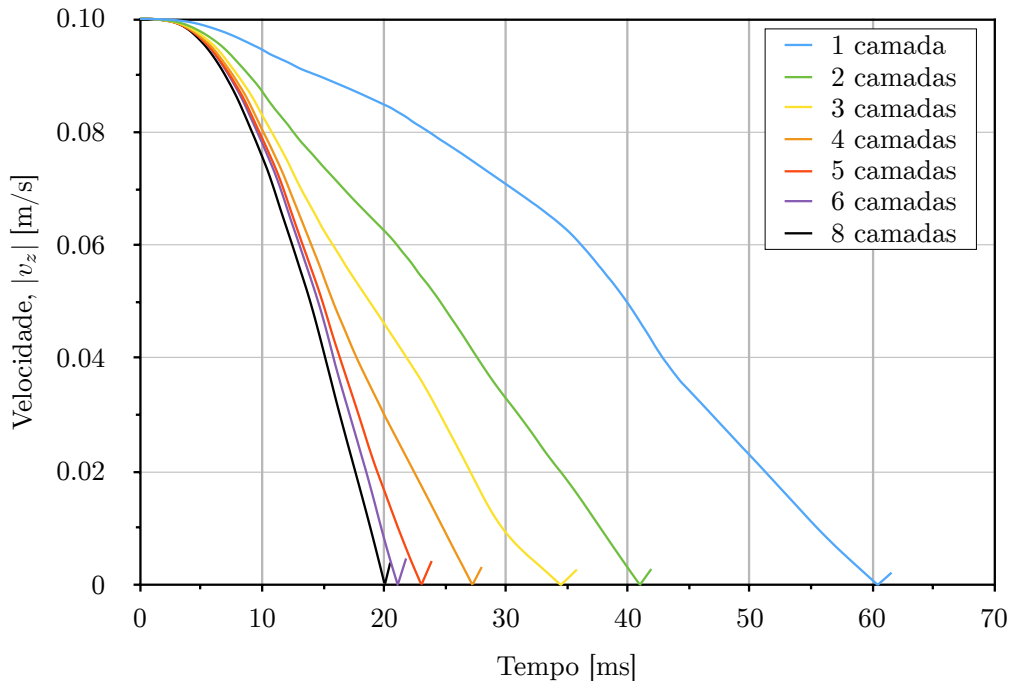


Figura 7.9: Velocidade vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferente número de camadas de tecido no alvo.

certificação de equipamentos de proteção pessoal. Assim, este estudo foi levado a cabo tendo em conta que a posição vertical da faca corresponde à mesma cota do topo da primeira camada de tecido. Na Figura 7.10 são apresentadas as curvas de deslocamento da faca ao longo do tempo de ensaio. Verifica-se uma tendência de menor penetração da faca com o aumento do número de camadas. Como seria de esperar, existe uma associação clara entre o aumento do número de camadas de tecido e o aumento da dificuldade de penetração da faca.

Observa-se também um movimento oscilatório da faca nos ensaios. Tal se deve ao facto do atrito existente entre a faca e os *yarns*, no processo de subida, acompanhado pela acumulação de energia elástica fazer com que a energia cinética da faca seja totalmente dissipada, ficando esta vulnerável à ação elástica do tecido, que lhe volta a impor movimento no sentido negativo. Esta tendência é de esperar, cada vez com oscilações de menor amplitude, até ao ponto em que toda a energia seja dissipada. Um facto interessante é que em nenhum dos ensaios realizados no âmbito do estudo presente nesta secção houve uma separação total da faca com o tecido, pelo que se compreende que o atrito desempenha um papel importante no processo de redução da velocidade da faca.

Ao nível das acelerações desenvolvidas pela faca, uma vez mais existe uma tendência generalizada no comportamento das curvas com a variação da quantidade de camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>. Na Figura 7.11 é possível observar o comportamento desta grandeza. Apesar do possível ruído nestas curvas, é evidente a existência de dois conjuntos de picos, um na fase positiva do gráfico e outro na fase negativa. O primeiro apresenta uma magnitude maior devido à pouca energia cinética que foi dissipada até esse instante.

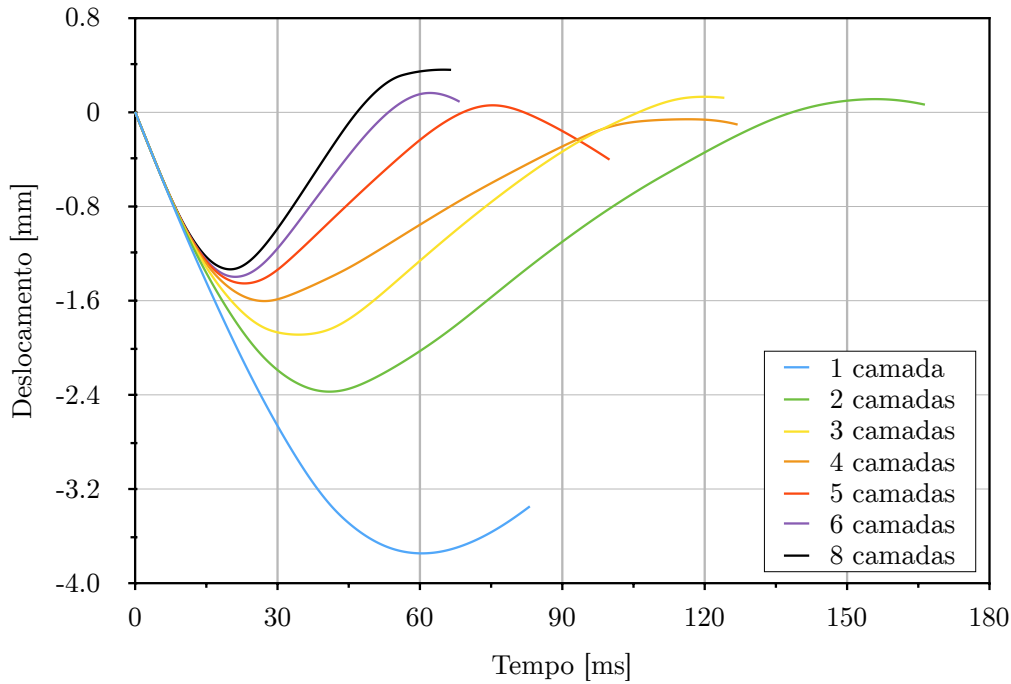


Figura 7.10: Deslocamento vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferente número de camadas de tecido no alvo.

Com o intuito de perceber o efeito da variação do número de camadas numa escala mais alargada, foi ainda realizada uma comparação da velocidade da faca em cada ensaio relativamente ao ensaio de referência, com duas camadas de tecido. Na Figura 7.12 é possível observar-se que o aumento do número de camadas de tecido não provoca uma redução constante da velocidade, pelo que apresenta um comportamento que pode ser descrito com recurso a uma função logarítmica de base natural, expressa por

$$\Delta v = a \ln N - b \quad (7.3)$$

onde  $a = 0.0213$ ,  $b = 0.0112$ ,  $\Delta v$  representa a redução de velocidade da faca em relação ao ensaio de referência, medida no instante  $t = 15$  ms, e  $N$  o número de camadas de tecido de cada ensaio. Com coeficiente de correlação  $R^2 = 0.9846$ , esta função revela que a variabilidade dos resultados face a esta função é de apenas 1.54%. No entanto, o domínio da função apresenta um papel essencial para a veracidade dos resultados aproximados através desta. Isto é devido ao domínio real da função conduzir a valores negativos de redução de velocidade quando o número de camadas é reduzido e também ao facto de, na realidade, a redução de velocidade apresentar o seu máximo (e continuação monótona com o aumento do número de camadas) igual ao valor de velocidade absoluta registada no ensaio de referência, o que representa a imobilização da faca. Assim, e sabendo que o domínio real de uma função logarítmica não apresenta estas duas características, apenas se garante uma boa descrição dos resultados no domínio  $N = ]1, 9[ \forall N \in \mathbb{N}$ .

Por último, é importante perceber como se caracteriza este fenómeno físico em termos de tensões sofridas no conjunto de camadas de Kevlar-29<sup>®</sup> que formam o alvo. Na

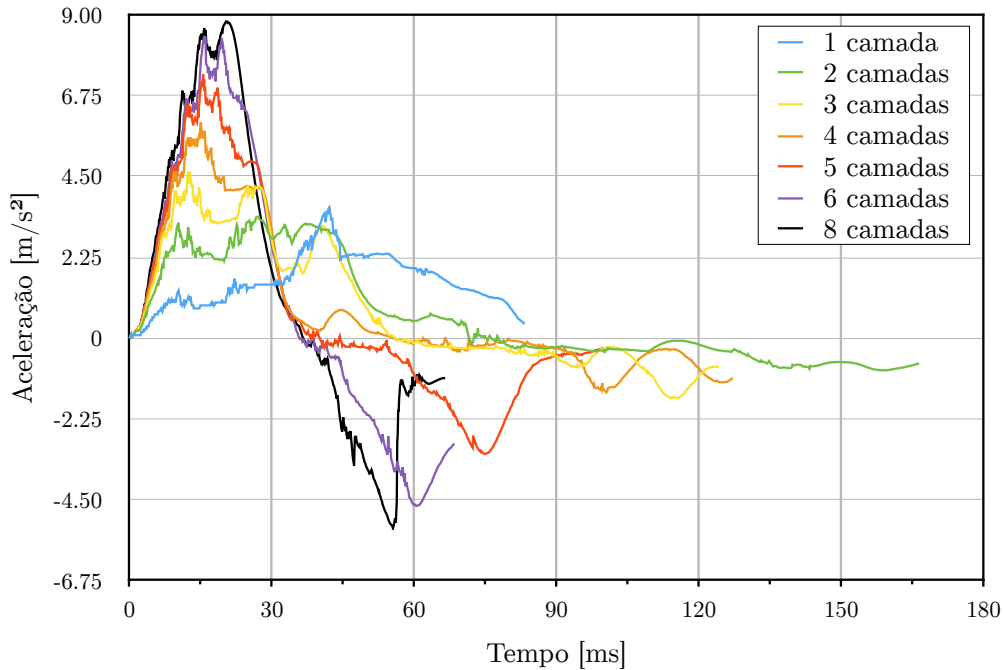


Figura 7.11: Aceleração vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferente número de camadas de tecido no alvo.

Figura 7.13 é possível observar a distribuição de tensões nas direções  $Ox$  e  $Oy$ ,  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , respetivamente. Os *yarns* orientados segundo a direção  $Ox$  revelam uma distribuição mais alargada das tensões ao longo da sua largura, facto derivado do ponto de contacto inicial da faca com o tecido ser um *yarn* desta série. Isto faz com que os *yarns* da série perpendicular a esta surjam com uma forte acumulação de tensões incidente nas suas arestas, resultando da forma como o movimento e respetivas forças de contacto lhes são transmitidas, isto é, através das forças de atrito.

### 7.5.2 Camadas desalinhasdas

Dada a dificuldade de posicionamento das camadas de tecido de forma a ficarem perfeitamente alinhadas, é natural que ocorram desvios devido a todo o processo de confeção de equipamentos de proteção pessoal. Por outro lado, a flexibilidade dos mesmos não garante um alinhamento permanente, mesmo que ele existisse na altura do fabrico.

Deste modo, considera-se importante realizar também um estudo da influência da variação do alinhamento de camadas sucessivas. Foram realizados ensaios com 2, 4, 6 e 8 camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>, com a primeira camada de tecido exatamente na mesma posição das que se encontram afetadas aos ensaios do ponto anterior, e com um deslocamento da camada seguinte nas duas direções de um plano paralelo a esta, sendo este processo de desalinhamento efetuado a cada duas camadas consecutivas. O desvio em cada uma das duas direções apresenta um valor correspondente à soma da largura de meio *yarn* com a largura de meio espaçamento entre *yarns*, o que perfaz um total de 0.688 mm. Na Figura 7.14 é possível observar-se a representação típica de um dos alvos utilizados neste estudo.

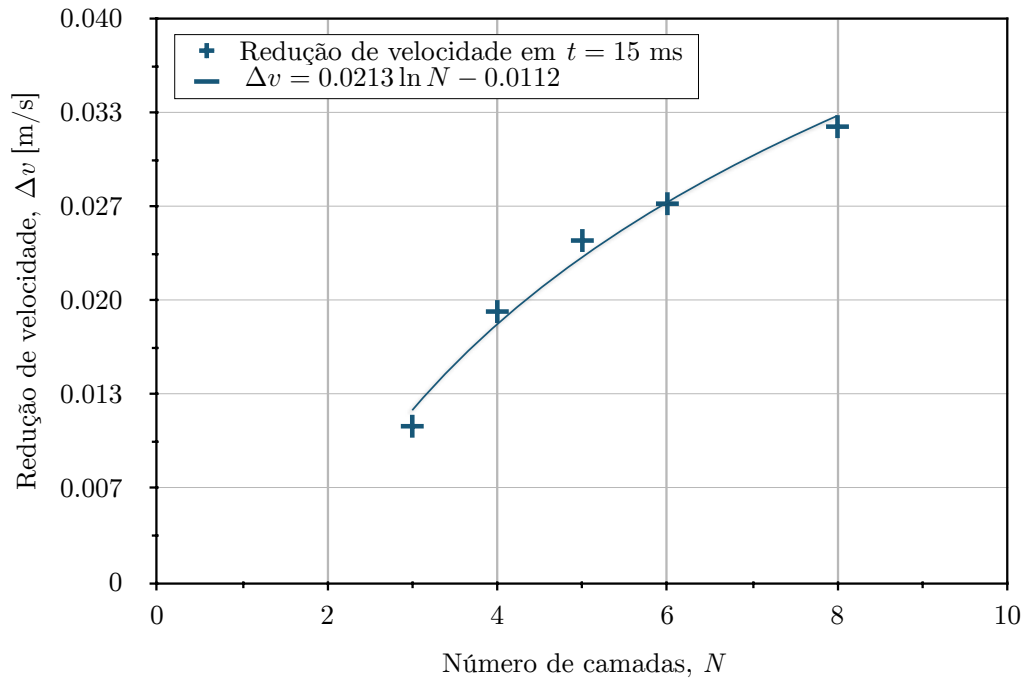


Figura 7.12: Redução de velocidade da faca em relação ao ensaio de referência (duas camadas de tecido) para o instante  $t = 15$  ms.

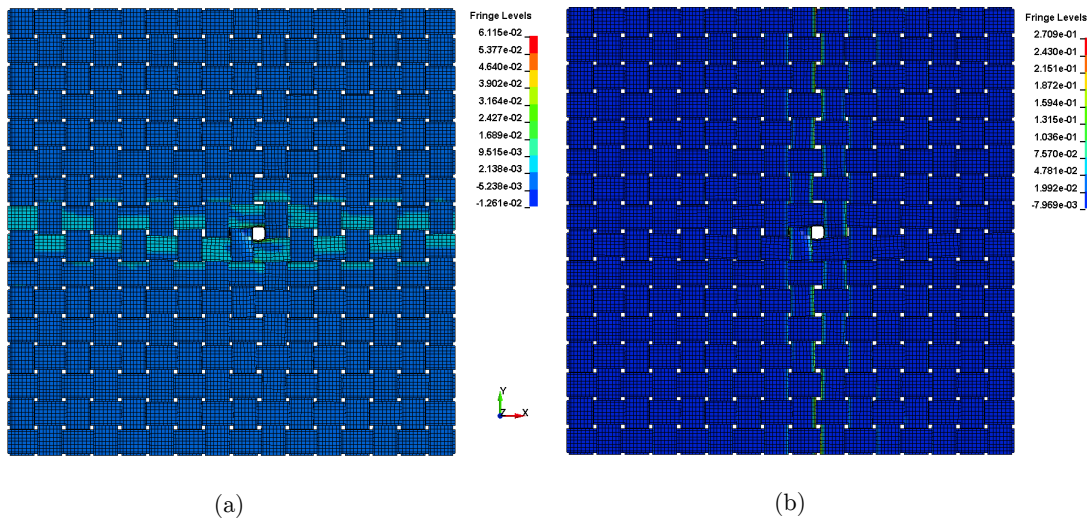


Figura 7.13: Distribuição de tensões (a)  $\sigma_x$  e (b)  $\sigma_y$ .

O ponto de impacto da faca manteve-se inalterado.

No gráfico da Figura 7.15 é possível observar os perfis de velocidade dos ensaios com camadas desencontradas bem como a comparação com os ensaios realizados anteriormente, correspondentes ao mesmo número de camadas.

Como esperado, quando o alvo apresenta as camadas de tecido sucessivamente desencontradas, a faca tende a parar mais depressa. A mesma análise é possível ser feita na

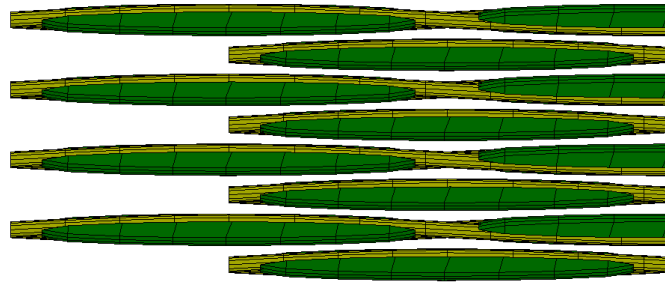


Figura 7.14: Representação da configuração do alvo utilizada no estudo com 8 camadas desencontradas.

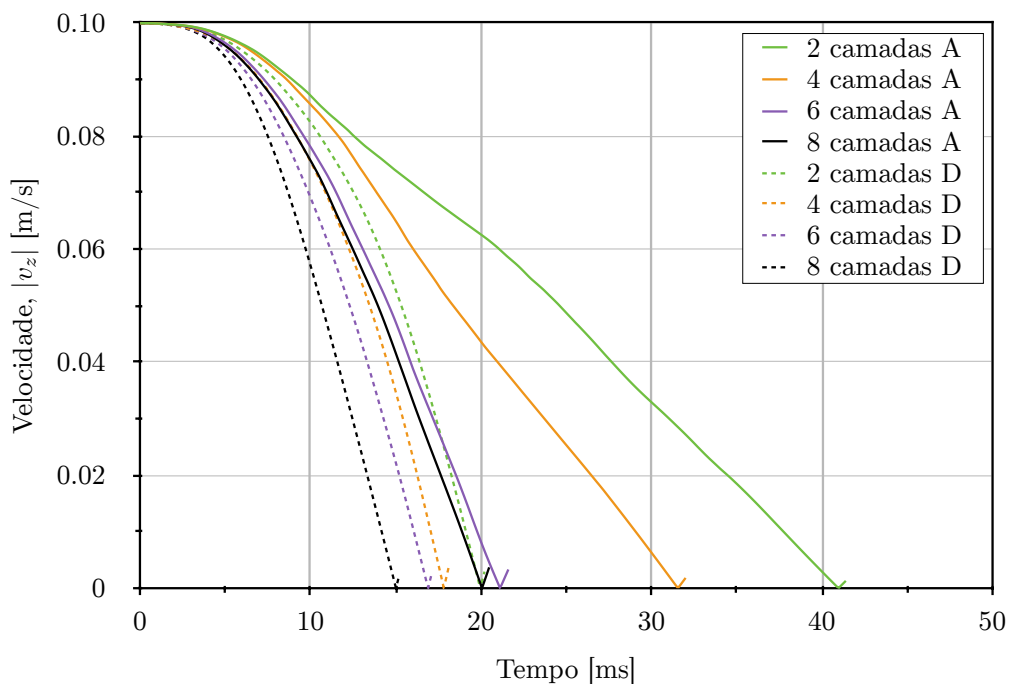


Figura 7.15: Velocidade da faca em função do tempo de ensaio, com variação do número de camadas de tecido no alvo, para camadas alinhadas (A) e desencontradas (D).

ótica do aumento do número de camadas, que à semelhança do que acontecia no estudo anterior, existe uma tendência para o aumento do declive dos perfis de velocidade com o aumento do número de camadas.

Apesar da primeira camada estar na mesma posição em ambos os estudos, e oferecer a mesma resistência à faca, a segunda camada possui um *yarn* exatamente no alinhamento da lacuna da primeira camada, por onde a faca penetra. Este facto induz a que a faca contacte exatamente no meio deste *yarn*, o que faz com que a resistência ao movimento não seja apenas devida ao atrito de escorregamento mas também à resistência imposta ao início desse escorregamento.

À semelhança do estudo anterior, importa analisar a penetração da faca no tecido e realizar uma comparação entre os dois. No gráfico da Figura 7.16 observa-se uma ten-

dência evidente para a diminuição da penetração máxima com o aumento do número de camadas de tecido do alvo. Mais ainda, comparativamente ao estudo com as camadas perfeitamente alinhadas, existe uma redução da penetração máxima de faca em cada tipo de alvo, observável pelo facto dos mínimos globais dos perfis de deslocamento apresentarem valores com magnitude inferior. Esta alteração de comportamento torna-se evidente dada a maior rigidez oferecida pelo alvo ao movimento da faca.

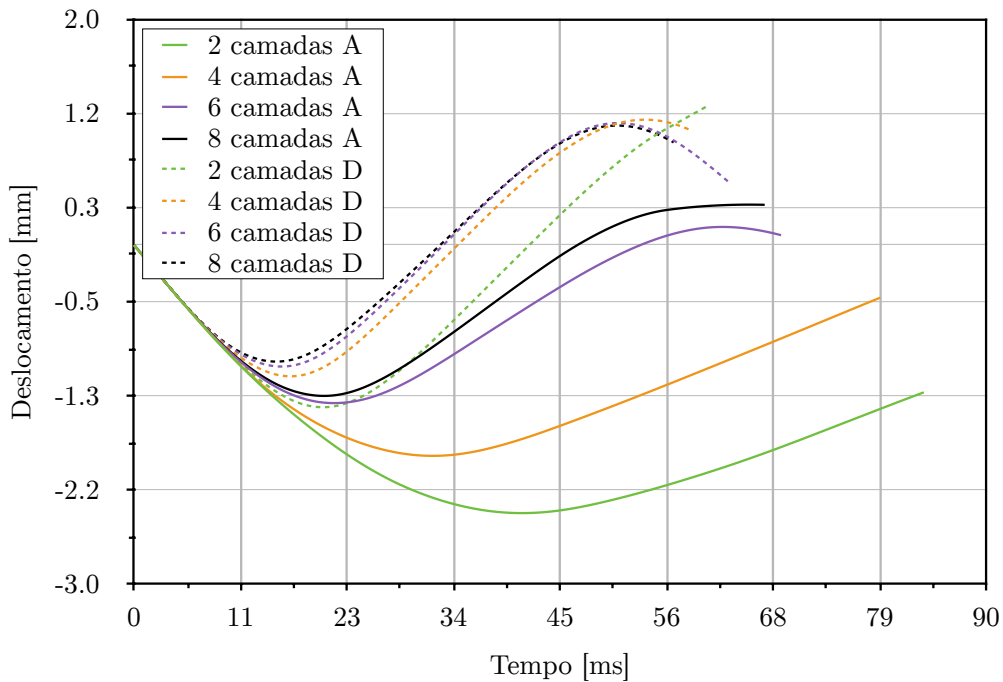


Figura 7.16: Deslocamento vertical da faca em função do tempo, com variação do número de camadas de tecido no alvo, para camadas alinhadas (A) e desencontradas (D).

Quanto às acelerações, é possível verificar na Figura 7.17 que a zona de picos inicial se encontra sensivelmente no mesmo instante de tempo. No entanto, a magnitude destas acelerações é notoriamente superior à do estudo com camadas perfeitamente alinhadas.

O aumento de rigidez do alvo pela forma como as camadas estão dispostas e a eliminação de lacunas que atravessem toda a sua espessura contribui para este aumento de magnitude. Uma diferença encontrada ao nível do comportamento dos perfis de aceleração foi precisamente o ruído numérico já comentado anteriormente. No conjunto de ensaios correspondente ao alvo com camadas desalinhadas existe uma diminuição considerável da interferência, o que garante que não se trata de ruído numérico produzido pela forma com a integração é feita, mas sim pelo facto de haver desvios bruscos dos *yarns* induzidos pela existência de lacunas geradas pelo alinhamento das camadas. É possível, portanto, perceber que um desencontro das camadas e preenchimento destas lacunas ao longo da espessura do alvo leva a que as forças de impacto sejam melhor distribuídas pelo tecido e, conseqüentemente, as acelerações apresentem um perfil de evolução mais suave. De notar também que o ensaio com quatro camadas desalinhadas apresenta uma variação que se destaca dos restantes três ensaios, que entre si apresentam sensivelmente o mesmo valor máximo. Este aumento inesperado da aceleração máxima do ensaio com



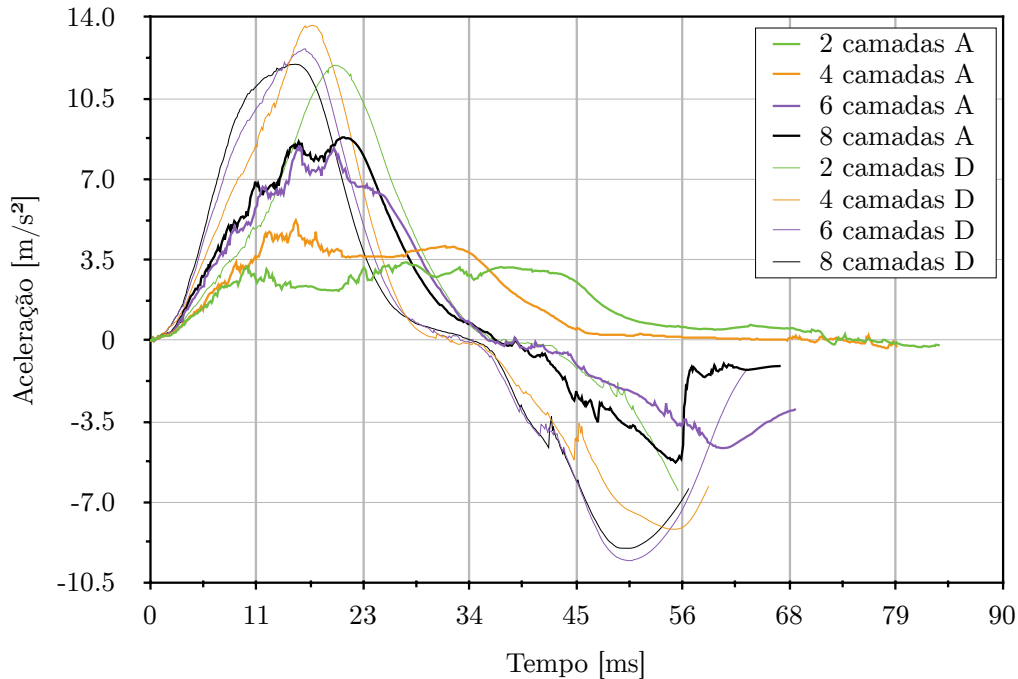


Figura 7.17: Acelerações da faca em função do tempo, com variação do número de camadas de tecido no alvo, para camadas alinhadas (A) e desencontradas (D).

quatro camadas tem a sua origem, possivelmente, num deslocamento irregular de um ou mais *yarns*.

## 7.6 Influência da cortiça na capacidade de proteção do alvo

Como referido anteriormente, um dos objetivos deste trabalho prende-se na introdução de uma ou mais camadas de um material com elevado coeficiente de atrito no alvo e avaliar as alterações na capacidade de proteção do conjunto. Por esta razão, foram realizados diversos ensaios com configurações e espessuras variadas, com especial enfoque no material introduzido: o micro-aglomerado de cortiça NL20, da gama de produtos CORECORK<sup>®</sup>, produzidos pela Amorim Cork Composites.

Os ensaios realizados têm como base duas espessuras de MAC distintas: 1 e 0.6 mm, com variação na quantidade de camadas deste material e na sua disposição no seio do alvo. Assim, de forma a facilitar o reconhecimento de cada configuração, os alvos são representados com recurso a uma nomenclatura alfanumérica do tipo

NX-NX-NX-NX

onde N representa o número de camadas relativas a cada material colocado nessa posição e representado por X, em que K designa o Kevlar-29<sup>®</sup> e C o micro-aglomerado de cortiça. Na ausência do algarismo representado por N, assume-se a existência de apenas 1 camada do respetivo material. Esta representação, lida da esquerda para a direita, representa a disposição das camadas no sentido do movimento do impactor (faca).

A título de exemplo, a representação K-C-K-C-K descreve um alvo com uma camada de tecido, uma placa de MAC, nova camada de tecido, outra placa de MAC e uma última camada de tecido. Este alvo encontra-se esquematizado na Figura 7.18.

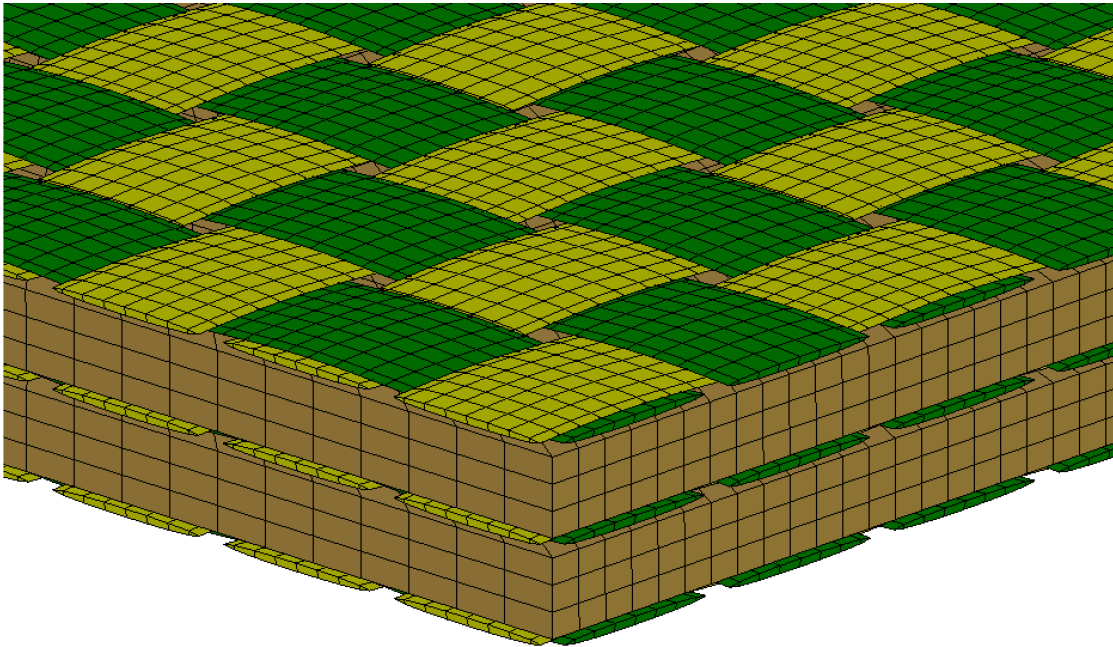


Figura 7.18: Exemplo da configuração do alvo após a introdução de MAC, numa configuração K-C-K-C-K.

Para o estudo da influência da cortiça na capacidade de proteção do alvo, foram realizados os ensaios descritos na Tabela 7.2. Ao nível dos ensaios realizados com 1 mm de micro-aglomerado de cortiça, foi analisado o comportamento de cada configuração ao nível da velocidade da faca ao longo do ensaio, penetração no alvo e aceleração.

Tabela 7.2: Ensaios realizados com introdução de micro-aglomerado de cortiça no alvo.

Espessura de MAC	Configuração
1 mm	K-C-K
	K-2C-K
	K-4C-K
	K-C-K-C-K
0.6 mm	K-C-K
	K-2C-K
	K-3C-K
	K-C-K-C-K

A introdução de várias placas de cortiça com espessuras menores, ao invés de uma placa de cortiça com uma espessura maior, surge na tentativa de avaliar o papel do atrito entre as faces do MAC e a sua influência no movimento de penetração da faca.

Na Figura 7.19 é possível observar as curvas de velocidade da faca relativas a cada ensaio. Existe um aumento claro da capacidade de paragem da faca com a diminuição

do número de camadas de MAC envolvidas, mantendo a espessura total deste material. Expectavelmente, o facto de se introduzir uma camada de tecido entre duas placas de cortiça (K-C-K-C-K) revela uma maior capacidade de paragem do impactor face ao mesmo ensaio mas sem camada de tecido intermédia (K-2C-K). O aumento de rigidez do sistema pode estar associado a esta alteração.

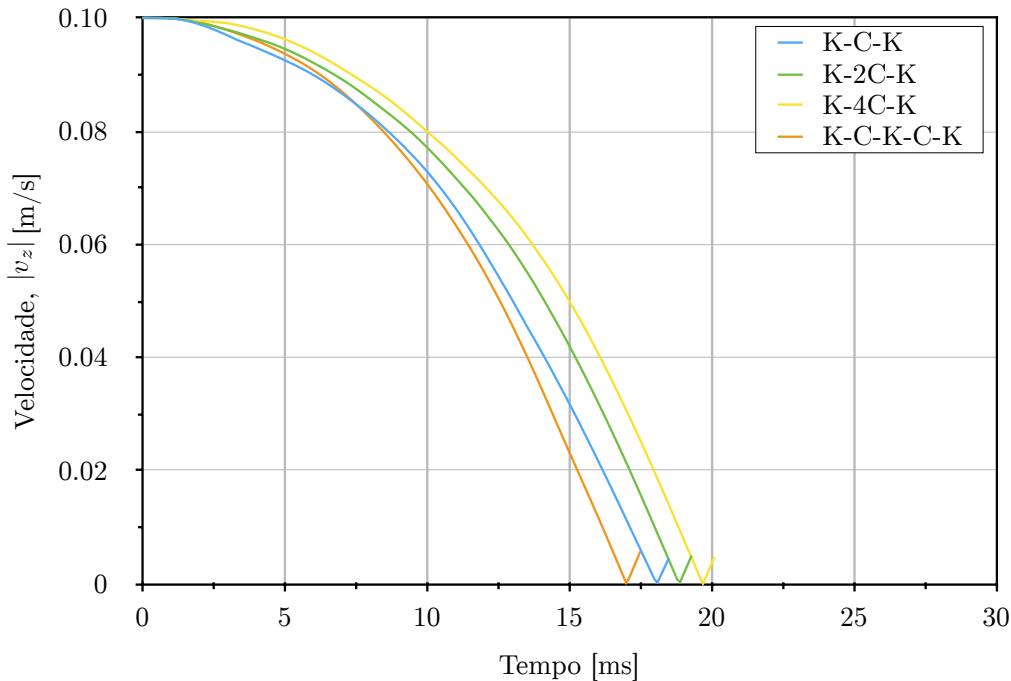


Figura 7.19: Velocidade vertical da faca em função do tempo de ensaio para uma espessura total de MAC de 1 mm.

Por outro lado, a penetração da faca no alvo, representada indiretamente através do deslocamento vertical apresentado na Figura 7.20, mostra uma tendência semelhante à da velocidade: o aumento da penetração máxima como o aumento da quantidade de camadas de MAC (mantendo a espessura). À parte disto, o ensaio com uma camada de tecido entre duas camadas de cortiça apresenta a menor penetração. Transversal a todos os ensaios é o facto do instante em que ocorre a penetração máxima aumentar com esta, visível pelo facto do primeiro mínimo de cada curva ser mais tardio nos ensaios com uma maior magnitude desse mínimo.

No que diz respeito às acelerações medidas diretamente na faca, os resultados que se mostram na Figura 7.21 revelam uma propensão para a existência de um pico de aceleração seguido de um pequeno pico de desaceleração. Este comportamento é seguido de uma estabilização com valor nulo das acelerações justificado pelo facto da faca se soltar do alvo e adquirir movimento de corpo rígido com velocidade constante no sentido ascendente. Esta reação do sistema é transversal a todos os ensaios, sendo que todos eles apresentam máximos com uma magnitude semelhante, distinguíveis pelo facto de umas curvas aparecerem mais adiantadas que outras. Este facto foi também verificado na avaliação da penetração referida anteriormente.

Uma avaliação mais detalhada das curvas de aceleração revela uma semelhança ao

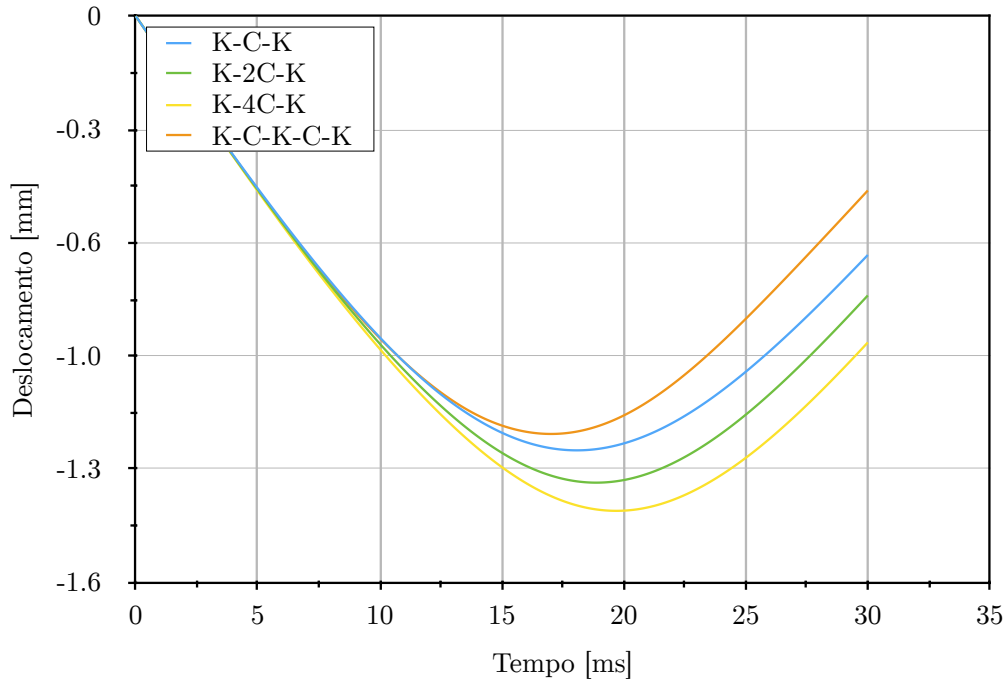


Figura 7.20: Penetração da faca em função do tempo de ensaio para uma espessura total de MAC de 1 mm.

nível do comportamento e uma diferença de magnitude dos seus máximos relativamente reduzida, o que indica uma boa coerência entre os ensaios no que toca ao comportamento da faca ao longo do impacto.

Em termos da distribuição de tensões, importa ainda verificar qual o comportamento do sistema quer no tecido quer na cortiça. Como é possível verificar na Figura 7.22a, a distribuição de tensões  $\sigma_x$  apresenta um maior gradiente nos *yarns* relativamente às tensões  $\sigma_y$ , representadas na Figura 7.22b. Dada a localização do impacto torna-se claro que a distribuição de tensões  $\sigma_x$  deriva do facto dos *yarns* estarem a ser comprimidos (tensionados), quer pela faca quer pela outra série de *yarns*. Já na direção  $Oy$ , as tensões aparecem acumuladas nas arestas devido à tensão ser aqui maioritariamente resultante do atrito existente nas interações desta série de *yarns* e não da compressão gerada pelo impacto.

Por outro lado, dada a espessura considerável da cortiça face ao tecido, apresentam-se na Figura 7.23 as tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , analisadas ao longo de um corte perpendicular ao plano da placa de cortiça. Como se pode observar pelo gradiente de cores, a ausência de uma distribuição triangular evidente revela a inexistência de tensões de flexão consideráveis, sendo que as tensões de contacto entre o tecido e o MAC se destacam face a estas.

Como referido anteriormente, foi também efetuada uma avaliação paramétrica semelhante mas com uma espessura total de MAC de 0.6 mm. Para o efeito, o foco recaiu igualmente na análise da velocidade, deslocamento vertical da faca e aceleração na direção do movimento. Na Figura 7.24 é possível observar a já esperada tendência do aumento da dificuldade de paragem da faca com o aumento do número de camadas de cortiça, mantendo a espessura de 0.6 mm. Para o ensaio com uma camada adicional de

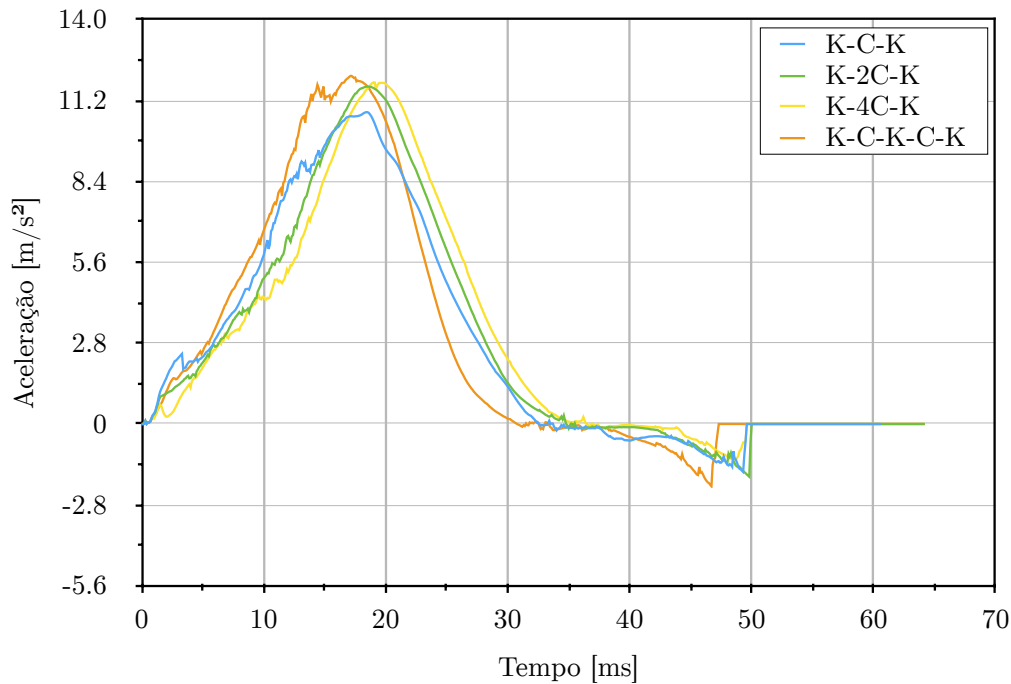


Figura 7.21: Acelerações verticais da face em função do tempo de ensaio para os ensaios com espessura total de MAC de 1 mm.

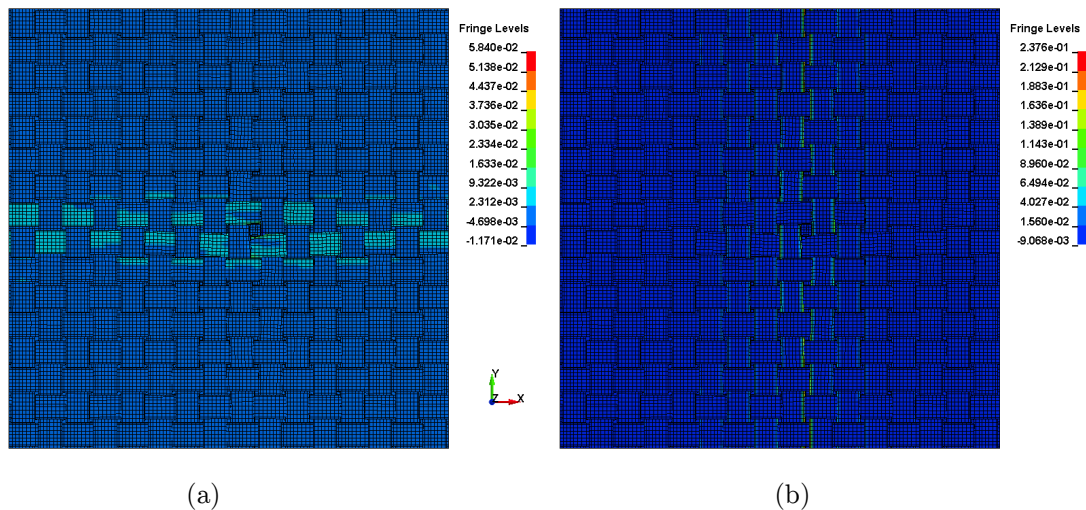


Figura 7.22: Distribuição de tensões (a)  $\sigma_x$  e (b)  $\sigma_y$  no tecido da face de ataque, no ensaio K-C-K com 1 mm de MAC ( $t = 14$  ms).

tecido no meio de duas placas de cortiça observa-se novamente uma maior capacidade de absorção de energia, dada a sua maior rigidez estrutural.

De igual modo, na Figura 7.25 é notória a diminuição da penetração máxima e o deslocamento dos mínimos das curvas para a esquerda, o que corrobora a ideia de que o aumento do número de camadas deste material celular prejudica a processo de paragem

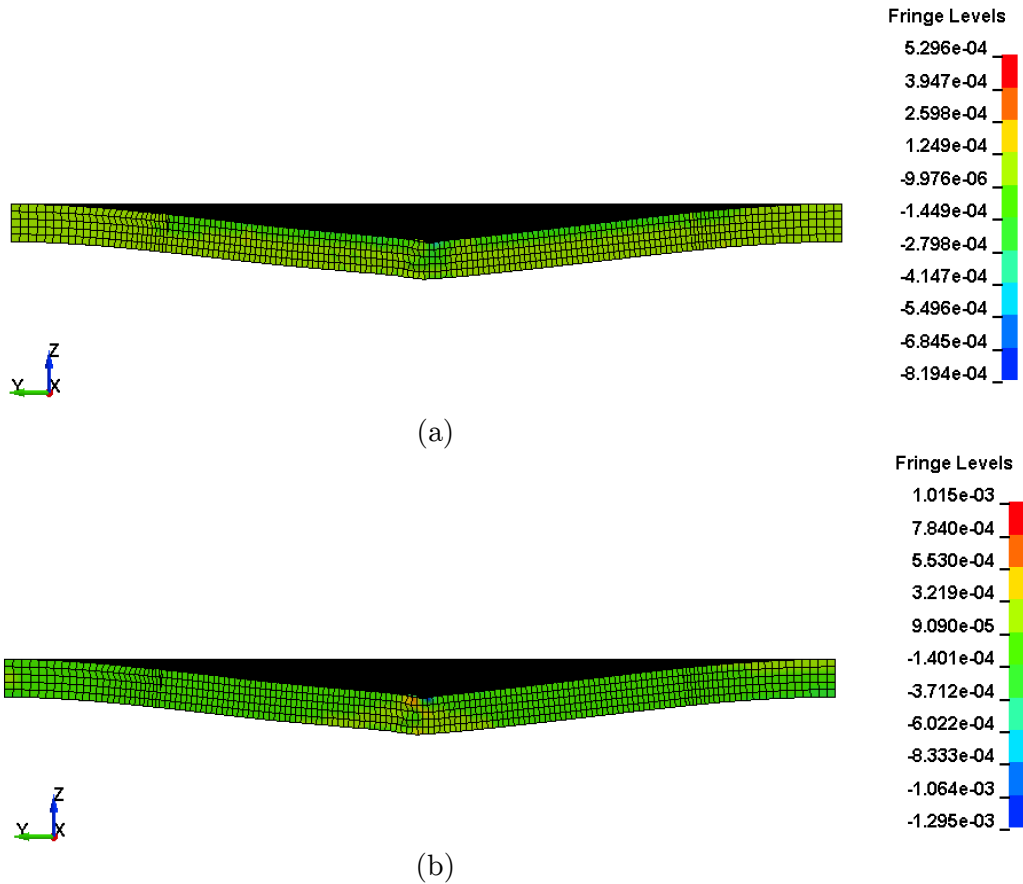


Figura 7.23: Distribuição de tensões (a)  $\sigma_x$  e (b)  $\sigma_y$  da placa de cortiça, no ensaio K-C-K com 1 mm de MAC ( $t = 14$  ms).

da faca. Todos os ensaios apresentam uma separação total da faca relativamente ao alvo, após o processo de paragem da mesma e da imposição de velocidade em sentido contrário.

Numa perspetiva de acelerações, com um comportamento semelhante, os máximos globais acontecem num instante de tempo a rondar aquele em que os máximos se registaram nos ensaios com uma espessura total de cortiça de 1 mm, visível na Figura 7.26. Também aqui é possível observar a separação do conjunto faca-alvo, e continuação de movimento uniforme por parte da faca, através da estabilização das curvas com valor nulo a partir de determinado instante de tempo.

## 7.7 Influência da configuração do alvo

Com as análises anteriormente descritas não é possível tecer conclusões acerca do efeito da posição relativa dos constituintes do alvo. Assim, impera a necessidade de realizar novos estudos recorrendo à fixação da quantidade de cada material e variar apenas a posição relativa de cada camada. Assim, foram realizados ensaios com 3 camadas de tecido e cortiça (espessura total de 0.6 mm), em configurações do tipo 2K-C-K, K-C-2K e K-C-K-C-K.

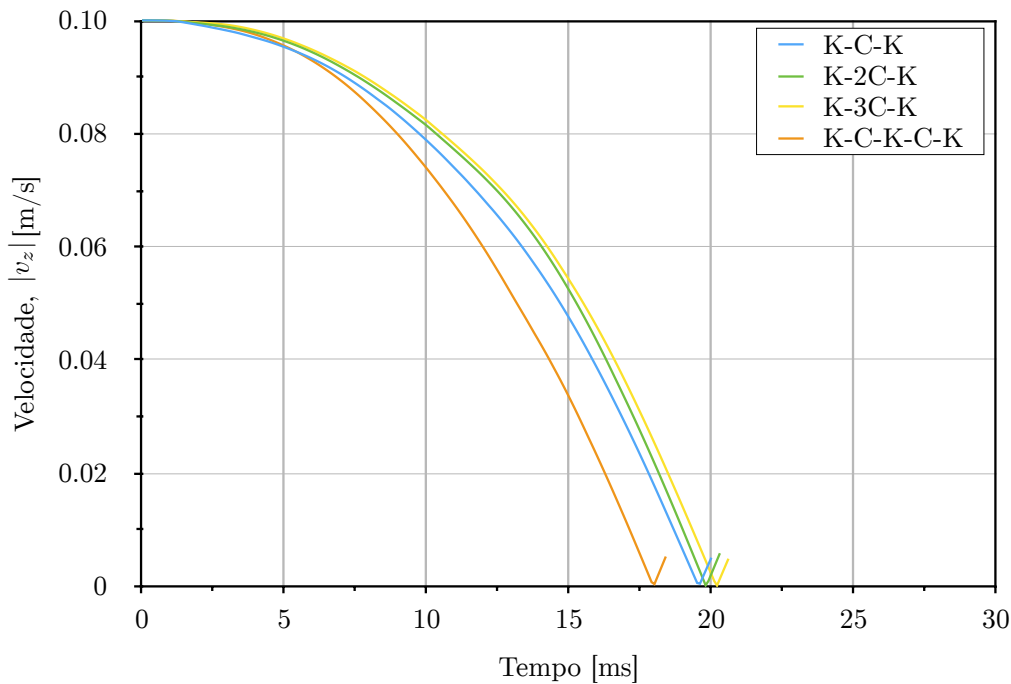


Figura 7.24: Velocidade vertical da faca em função do tempo de ensaio para uma espessura total de MAC de 0.6 mm.

Quando analisados os resultados em termos do processo de redução de velocidade da faca, através da Figura 7.27 observa-se que existe uma diferença significativa entre ter mais ou menos camadas de tecido na face de ataque do alvo, dada a redução de velocidade da faca ser mais lenta. Esta capacidade de redução de velocidade da faca melhora quando deslocada uma camada de tecido para o meio do alvo.

Quanto ao comportamento do sistema em termos de acelerações da faca, é possível observar, através dos resultados da Figura 7.28, que a magnitude máxima da aceleração da curva relativa ao ensaio 2K-C-K apresenta um valor menor que as outras duas. Este facto revela boa coerência com os resultados relativos à velocidade, uma vez que um alvo que provoca uma menor redução de velocidade induz menores acelerações na faca.

A penetração máxima, analisada através dos resultados que se mostram na Figura 7.29, acontece no ensaio em que a redução de velocidade é mais demorada. Este facto conduz a que se possa perceber que, à partida, uma maior quantidade de tecido na face inferior do alvo resultaria numa redução de velocidade mais rápida e, consequentemente, acelerações maiores. Este fenómeno dá-se, provavelmente, pela dificuldade crescente que a cortiça tem em abrir/propagar a fenda aquando da compressão imposta pela faca, dado o constrangimento que um maior número de camadas de tecido na face inferior do alvo provoca.

De notar ainda que, para a energia estabelecida, a faca é completamente imobilizada com imposição de movimento em sentido contrário. A partir de um certo instante de tempo, a faca separa-se do tecido e adquire movimento uniforme, visível através da estabilização com valor nulo das curvas de aceleração.

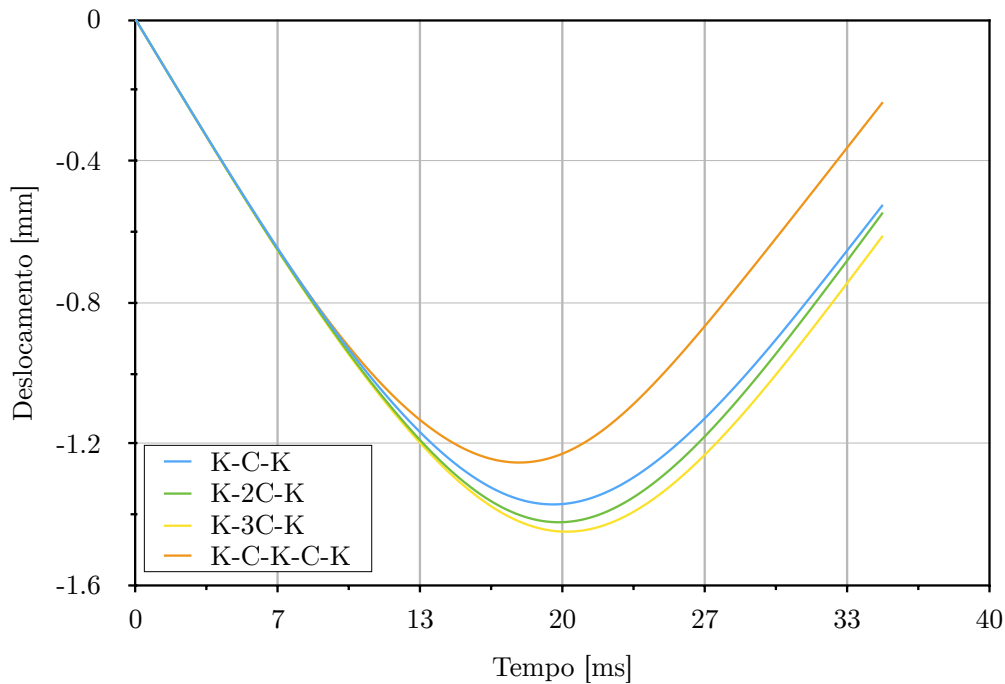


Figura 7.25: Deslocamento vertical da faca em função do tempo de ensaio para os ensaios com espessura total de MAC de 0.6 mm.

## 7.8 Análise da capacidade de proteção

Após a realização dos estudos paramétricos descritos anteriormente, é importante relacionar os resultados obtidos no sentido de avaliar a influência da inclusão de cortiça na capacidade de proteção dos alvos quando comparados com alvos sem cortiça, conforme um dos objetivos propostos no início do documento. Para o efeito, foram colocados em paralelo os ensaios relativos a alvos com e sem cortiça, mantendo o mesmo número de camadas de tecido (alinhadas). Assim, foi comparado o ensaio relativo ao alvo com 3 camadas de tecido com o ensaio com configuração K-C-2K. De forma a avaliar este efeito, na tentativa de perceber se o mesmo se revela para outra quantidade de camadas, foram também colocadas em evidência as diferenças apresentadas entre o ensaio relativo ao alvo com 2 camadas de tecido e o alvo com a configuração K-C-K. Na Figura 7.30 é possível comparar os resultados obtidos dos ensaios com e sem inclusão de cortiça, com 3 camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>.

Através dos perfis de velocidade é possível verificar que a inclusão de cortiça no alvo (espessura de 0.8 mm) proporcionou uma diminuição significativa do tempo que o alvo necessita para parar completamente a faca, chegando essa redução de tempo a ser cerca de 50%. No entanto, como em ambiente real é a penetração da faca que provoca os ferimentos, realizou-se também uma analogia ao nível desta. Daqui percebe-se que a inclusão de cortiça chega a provocar uma diminuição desta de cerca de 37%.

Como referido, foi também realizada uma segunda análise comparativa, recorrendo ao ensaio com 2 camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>. Esta análise pode ser observada através dos resultados da Figura 7.31. Como seria de esperar, na comparação agora apresentada



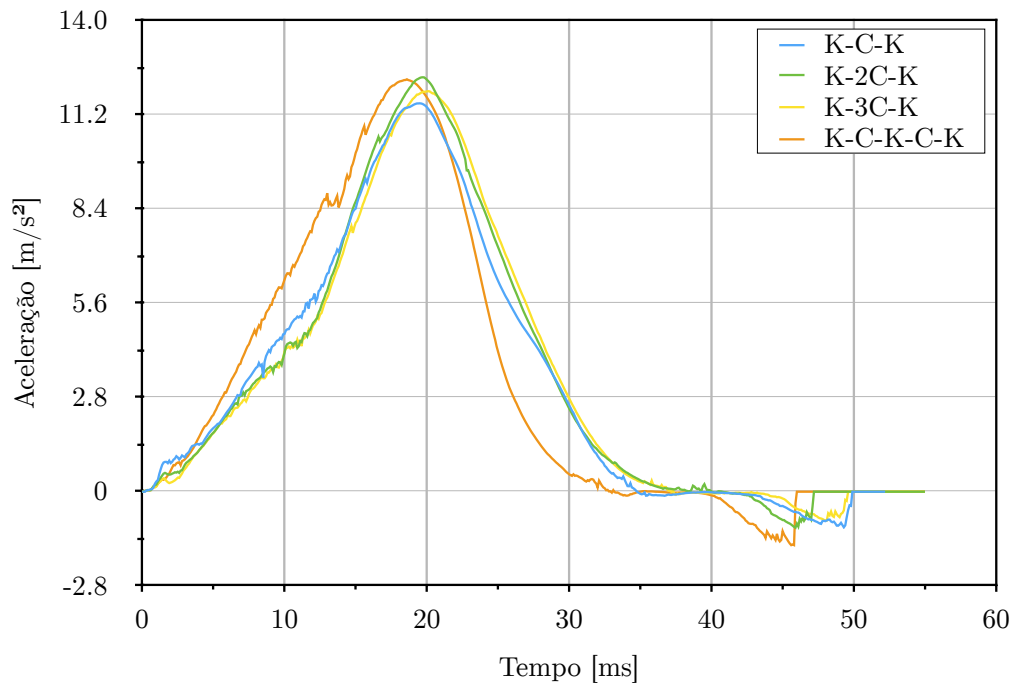


Figura 7.26: Acelerações verticais da faca em função do tempo de ensaio para os ensaios com espessura total de MAC de 0.6 mm.

observa-se o mesmo comportamento que a anterior, com a cortiça introduzida a representar um papel de melhoria notável na capacidade de proteção do alvo, com uma redução de cerca de 53% no tempo de paragem da faca e, mais importante, 42% de redução de penetração face à penetração da faca no alvo sem a presença da cortiça.

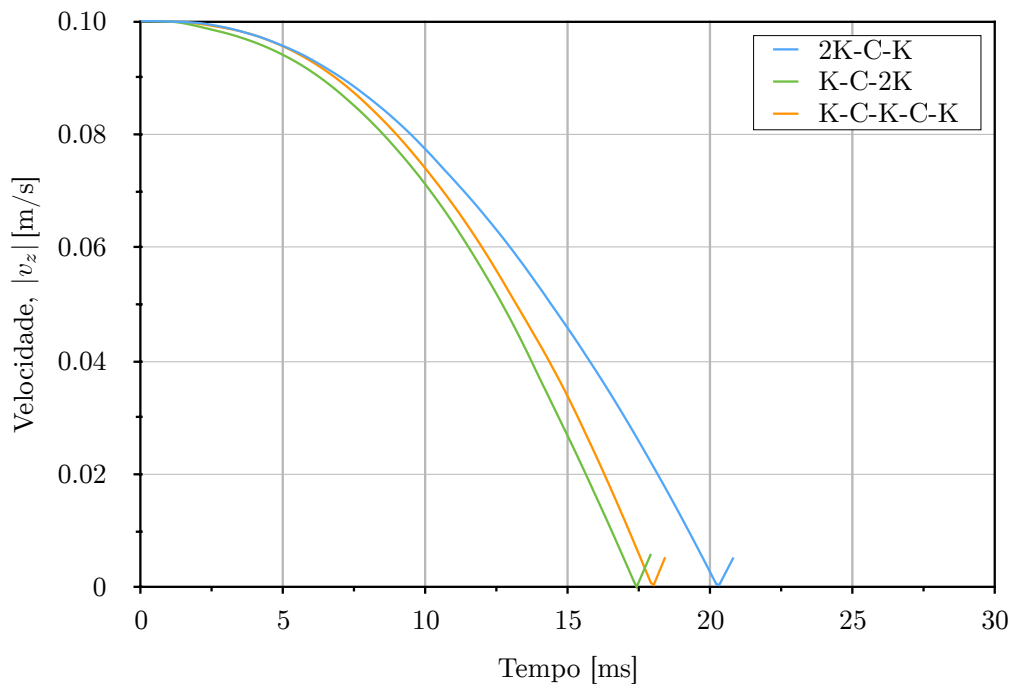


Figura 7.27: Velocidade vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferentes configurações do alvo.

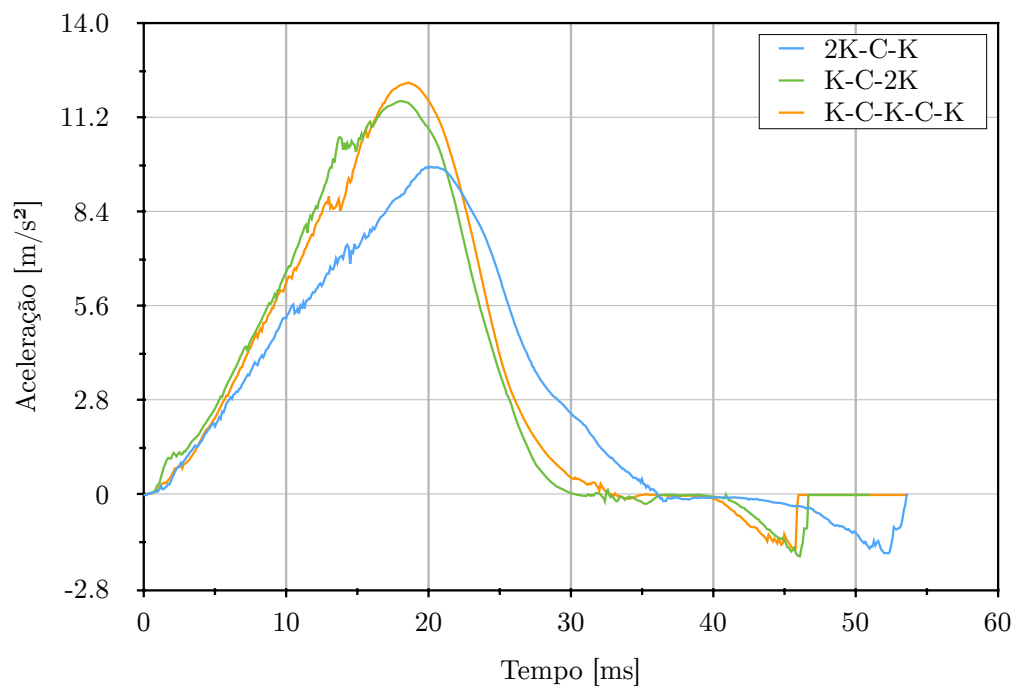


Figura 7.28: Aceleração vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferentes configurações do alvo.

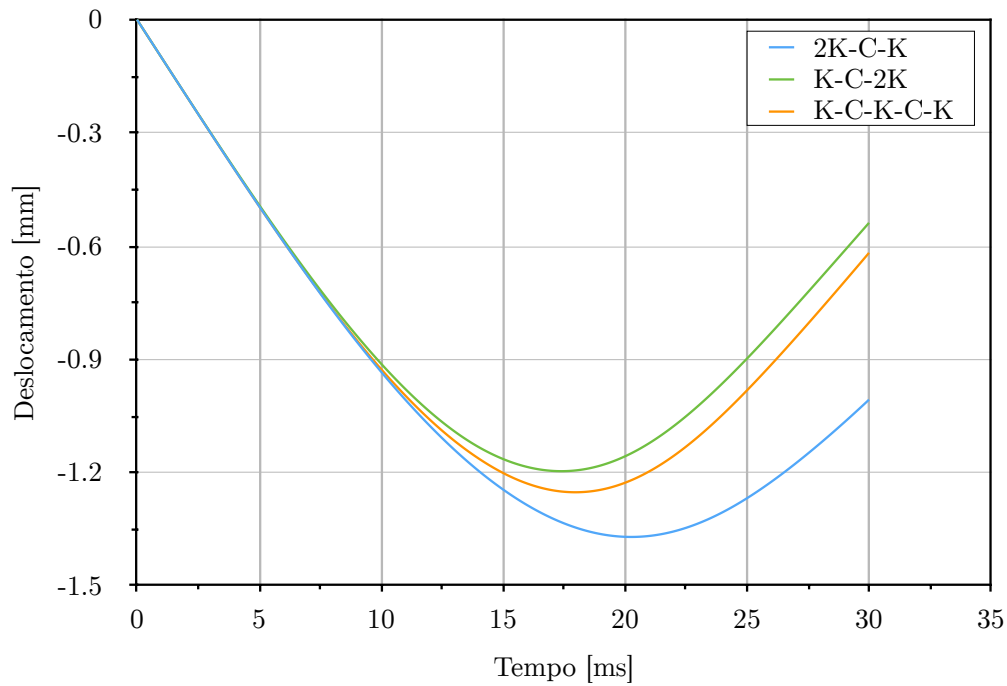


Figura 7.29: Deslocamento vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferentes configurações do alvo.

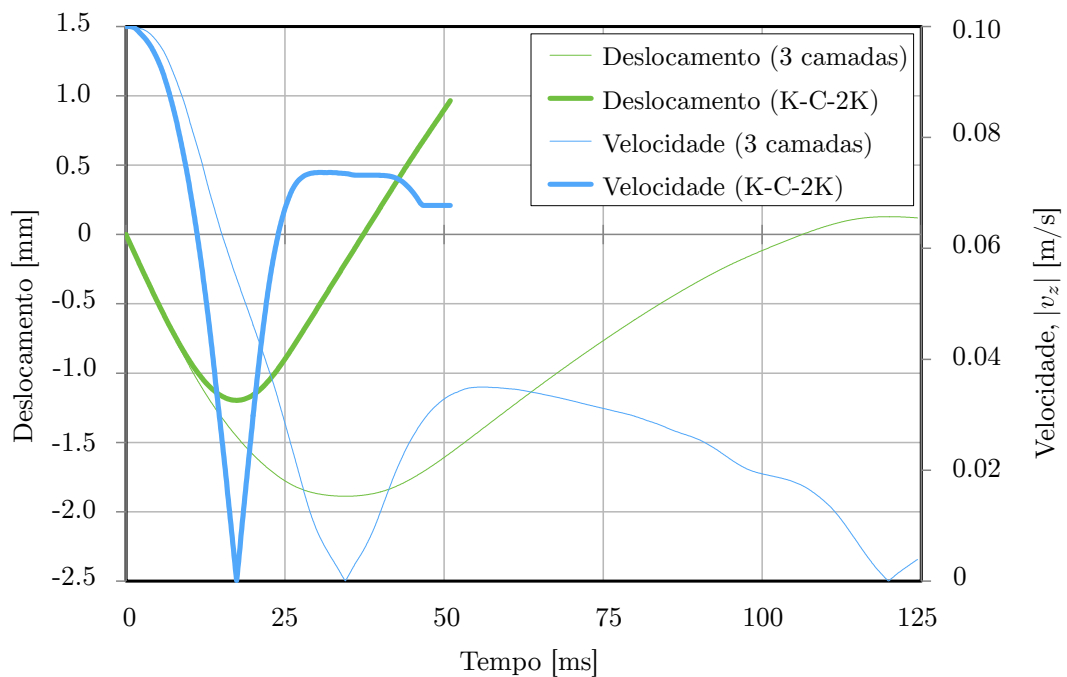


Figura 7.30: Evolução da velocidade e deslocamento da faca para alvos com 3 camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>, com e sem inclusão de cortiça.

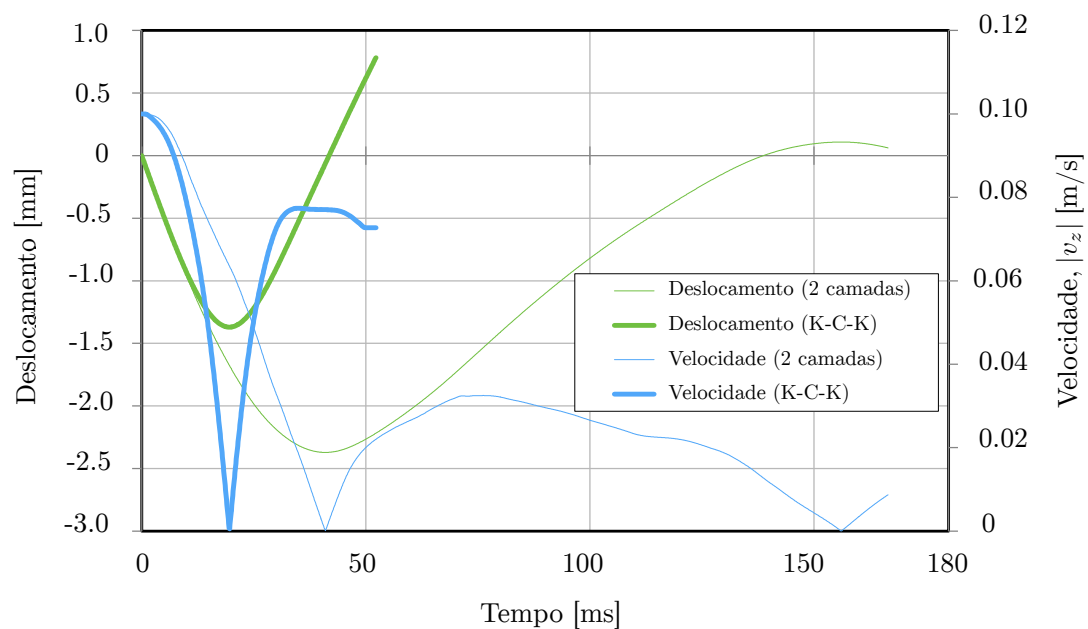


Figura 7.31: Evolução da velocidade e deslocamento da faca para alvos com 2 camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>, com e sem inclusão de cortiça.

## Capítulo 8

# Considerações finais

Associado aos crescentes índices de instabilidade social encontram-se níveis de criminalidade violenta cada vez maiores, principalmente com recurso a armas de pequeno porte e objetos com relativa facilidade de transporte e manuseamento, como é o caso de armas brancas e objetos cortantes. Dada a frequência com que forças militarizadas, corpos de polícia e equipas de segurança se expõem a ambientes de elevado risco, a utilização de equipamentos de proteção pessoal revela-se indispensável, nomeadamente ao nível do torso e zonas do corpo com maior risco de lesões graves. No entanto, a utilização destes equipamentos revela algumas exigências face à ação diária destes profissionais, além da capacidade de proteção, como é o caso da flexibilidade e conforto de utilização.

No decorrer desta dissertação foi investigada a capacidade de proteção de sistemas têxteis flexíveis no sentido de perceber qual a influência da alteração do número de camadas de tecido, a sua disposição relativa ou a introdução de materiais com elevado coeficiente de atrito.

Com os resultados obtidos através das simulações numéricas, tornou-se evidente que existem diversos fatores que condicionam a representação de sistemas deste tipo, isto é, que necessitem de quantidades elevadas de elementos para os representar, como é o caso do tempo de cálculo, da definição de atrito entre os componentes e da energia de impacto. No primeiro caso, observou-se que a utilização da técnica *mass scaling* torna-se uma ferramenta indispensável à realização de simulação nesta área. Por outro lado, o coeficiente de atrito revelou-se um fator que apresenta uma grande influência nos resultados numéricos. Foi possível concluir que o coeficiente de atrito que permite representar o fenómeno de escorregamento da faca pelos *yarns* corretamente é  $\mu = 0.1$ . Isto deve-se ao aumento das forças de contacto com o aumento do coeficiente de atrito, que leva ao desencadeamento de problemas do foro numérico.

Com a representação completa do modelo, o estudo da influência do número de camadas de Kevlar-29<sup>®</sup> mostrou que o aumento destas leva a um aumento na redução de velocidade e, dado o aumento da rigidez do alvo, os máximos de aceleração apresentam valores mais elevados. Por outro lado, como esperado, o aumento da quantidade de camadas induz uma penetração menor da faca no alvo. Observou-se ainda que o alvo tem um comportamento elástico que armazena a energia cinética da faca sob a forma de energia elástica. Quando o movimento desta é anulado, essa energia elástica acumulada é devolvida à faca e impõe uma velocidade em sentido oposto, menor que a inicial devido à dissipação de energia por atrito. Mais ainda, a redução de velocidade da faca com o

aumento sucessivo do número de camadas de tecido não é monotonamente crescente.

Tendo em conta as dificuldades inerentes ao alinhamento das camadas de tecido na prática, considerou-se necessário proceder também ao estudo do efeito da variação do número de camadas para alvos com estas desencontradas. Assim, constatou-se que as acelerações desenvolvidas pela faca apresentam perfis com muito menos ruído que os perfis dos ensaios com o alvo alinhado, justificado pela suavidade do movimento resultante da continuidade do tecido na direção da espessura. A penetração máxima registada foi menor que no estudo anterior, para todos os alvos estudados e a paragem da faca é mais rápida.

Sendo um dos objetivos principais desta dissertação, foram realizados ensaios com inclusão de cortiça no alvo, sob a forma de micro-aglomerado. Face a isto, e com a divisão do estudo em dois grupos, de acordo com a espessura de MAC utilizada, foi variado o número de placas de cortiça que se encontram entre duas camadas de Kevlar-29<sup>®</sup>. Os resultados revelam que o aumento do número de camadas de MAC adjacentes, ao invés de uma única placa com a mesma espessura total, prejudica o processo de paragem da faca, com o tempo de paragem a ser cada vez maior, tanto para uma espessura total de cortiça de 0.1 mm como 0.6 mm. A penetração da faca é também maior, como esperado, com o aumento do tempo de paragem da faca. Este facto é justificado pela facilidade de escorregamento desta após a abertura de fenda na cortiça, dada a maior liberdade de movimento da cortiça. Foi ainda realizado um estudo, para cada espessura de MAC, com configuração K-C-K-C-K, que apresentou vantagens relativamente aos outros ao nível da paragem e da penetração da faca. Tal comportamento tem justificação no aumento de rigidez que o tecido intermédio confere ao sistema.

No que respeita ao estudo da influência da configuração do alvo, mantendo a mesma quantidade de cada material, foi possível observar que a face de ataque do alvo é aquela que maior influência tem no seu desempenho. Esta conclusão é suportada pelo facto de, quando comparados os ensaios com configuração 2K-C-K, K-C-2K e K-C-K-C-K, ser notória uma variação nos resultados do ensaio com maior preenchimento na face de ataque comparativamente aos outros dois. Os resultados do ensaio com configuração 2K-C-K apresentam um maior tempo de paragem da faca bem como uma maior penetração. Conclui-se assim que quando se preenche com mais tecido as faces da cortiça opostas ao impacto, provavelmente devido à dificuldade imposta à abertura e propagação de fenda na cortiça, os alvos apresentam maior capacidade de redução da velocidade da faca e diminuição da penetração máxima, fator essencial para a proteção de lesões graves.

Contudo, o elevado tempo computacional requerido para a realização dos ensaios não se revelou compatível com a utilização de apenas um computador. Foram portanto utilizados 4 computadores distintos, quer ao nível de *hardware* como de *software*, pelo que existe a possibilidade de haver uma pequena margem de discrepância entre os resultados obtidos. Esta questão foi já apresentada no estudo realizado por Caçoilo [87], onde revela que existem fatores relacionados com os recursos computacionais que afetam os resultados numéricos.

Por último, torna-se relevante tecer algumas considerações acerca da inclusão de cortiça na generalidade. Dados os ensaios em análise, conclui-se que a inclusão de cortiça nos alvos compostos por Kevlar-29<sup>®</sup> apresenta vantagens significativas no que toca à capacidade de paragem da faca e de proteção contra penetrações. Foram registadas diminuições de 53% e 50% no tempo necessário à paragem da faca e 42% e 37% na

---

diminuição da penetração máxima da faca, para os ensaios com 2 e 3 camadas de tecido, respetivamente. Apesar do aumento da espessura inerente à inclusão do MAC (0.6 mm), este surge como um material que revela muito boas capacidades para o aumento da proteção de sistemas têxteis flexíveis que, conjugado com a configuração destes, pode potenciar ainda mais a sua utilização.





# Lista de Tabelas

2.1	Classificação das armas com base na densidade de energia cinética [2]. . . . .	13
2.2	Níveis de energia associados a cada nível de proteção contra facada segundo a norma NIJ-0115.00 [27]. . . . .	17
2.3	Resumo dos níveis de energia associados a cada nível de proteção contra facada presentes na norma HOSDB [30]. . . . .	19
3.1	Propriedades físicas e mecânicas do Kevlar-29 <sup>®</sup> [11]. . . . .	34
4.1	Propriedades físicas e mecânicas da cortiça em solicitação à compressão [57, 64]. . . . .	42
4.2	Propriedades mecânicas do micro-aglomerado de cortiça NL20 [66]. . . . .	44
6.1	Propriedades dos componentes do impactor real conforme a norma NIJ-0115.00 [27]. . . . .	52
6.2	Propriedades do modelo de comportamento do material *MAT_RIGID. . . . .	54
6.3	Propriedades geométricas da célula representativa unitária de Kevlar-29 <sup>®</sup> . . . . .	58
6.4	Propriedades elásticas (GPa) do Kevlar-29 <sup>®</sup> . . . . .	60
6.5	Propriedades elásticas (GPa) do Kevlar-29 <sup>®</sup> . . . . .	62
6.6	Resumo das propriedades numéricas dos modelos desenvolvidos. . . . .	66
7.1	Comparação dos métodos de cálculo do <i>timestep</i> . . . . .	71
7.2	Ensaaios realizados com introdução de micro-aglomerado de cortiça no alvo. . . . .	84



# Lista de Figuras

2.1	Representação do Estandarte de Ur, presente no Museu Britânico [1]. . . . .	8
2.2	Método de junção de placas de bronze para produção de vestes de proteção [1]. . . . .	8
2.3	Proteção rígida de torso utilizada pelos soldados Gregos, c. 800 AC [3]. . . . .	9
2.4	Padrão de composição das proteções do tipo <i>chainmail</i> (malha de ferro), vastamente utilizadas pela civilização Romana [4]. . . . .	10
2.5	Vista explodida do equipamento de proteção <i>Lorica Segmentata</i> [5]. . . . .	10
2.6	Colete de proteção pessoal utilizado pelos militares Japoneses na Segunda Guerra Mundial [6]. . . . .	11
2.7	Colete de proteção de torso flexível produzido pela empresa alemã Viking Tactics [7]. . . . .	12
2.8	Geometria e posição dos constituintes do alvo referido na norma NIJ-0115.00 (adaptado de [27]). . . . .	17
2.9	Desenho técnico da faca PSDB/P1/A [27]. . . . .	18
2.10	Desenho técnico da faca PSDB/S1/G [27]. . . . .	19
2.11	Desenho técnico do espigão <i>Spike (Long)</i> [27]. . . . .	20
2.12	Impactores utilizados pela HOSDB (versão 1, 1993) [28]. . . . .	20
3.1	Constituição dos tecidos (adptado de [33]). . . . .	24
3.2	Orientação e nomenclatura dos <i>yarns</i> (adaptado de [35]). . . . .	24
3.3	Diferentes geometrias de tecidos 2D. . . . .	25
3.4	Diferentes geometrias de tecidos tridimensionais (3D) [39]. . . . .	26
3.5	Modelo geométrico de Pierce com (a) secção do <i>yarn</i> circular e (b) secção do <i>yarn</i> elíptica [41]. . . . .	27
3.6	Modelo geométrico de Kemp com secção do <i>yarn racetrack</i> [41]. . . . .	28
3.7	Modelo geométrico de Hearle com secção do <i>yarn</i> lenticular [41]. . . . .	28
3.8	Origem geométrica da seção lenticular dos <i>yarns</i> . . . . .	30
3.9	Representação das secções: lenticular com $d = 0$ (verde), elíptica (azul) e <i>power-ellipse</i> com $n = 0.5$ (vermelho). . . . .	31
3.10	Superfície paramétrica de representação dos <i>yarns</i> (adapitado de [34]). . . . .	31
3.11	(a) Curva típica de tensão-deformação de um tecido do tipo <i>plain weave</i> com (b) pormenor incluindo a representação do efeito histerese (adaptado de [41]). . . . .	32
3.12	Estrutura molecular do Kevlar <sup>®</sup> , com monómero unitário a negrito e ligações de hidrogénio a tracejado [46]. . . . .	34
3.13	Observação de tecido de Kevlar-29 <sup>®</sup> ao microscópio ótico [48]. . . . .	35

3.14	Aplicações comerciais do Kevlar <sup>®</sup> : (a) composição estrutural de pneus, (b) utensílios técnicos resistentes ao corte e (c) revestimentos estruturais (adaptado de [33, 50, 51]). . . . .	36
4.1	Exemplos de materiais celulares: (a) esponja, (b) osso, (c) madeira de balsa, (d) poliuretano expandido, (e) espuma de cobre e (f) espuma de zircónia (adaptado de [54]). . . . .	37
4.2	Curva típica de tensão-deformação de um material celular [52]. . . . .	38
4.3	Esboço da estrutura celular da cortiça realizado por Robert Hooke e publicado no seu livro <i>Micrographia</i> em 1665 [60]. . . . .	40
4.4	(a) Composição química das paredes celulares da cortiça (1-celulose, 2-suberina e 3-lenhina), (b) direções principais convencionadas para representação da célula de cortiça (adaptado de [57]). . . . .	41
4.5	Microscopia eletrónica de varrimento das secções: (a) radial, (b) axial e (c) tangencial [54]. . . . .	41
4.6	Representação esquemática da perda de energia na cortiça devido ao coeficiente de perda inelástica [65]. . . . .	43
4.7	Curva tensão-deformação do MAC NL20. . . . .	44
5.1	Metodologia de análise de um problema com utilização do método dos elementos finitos (adaptado de [67]). . . . .	48
6.1	Representação tridimensional (a) e dos componentes internos (b) do impactor descrito na norma NIJ-0115.00 [27]. . . . .	52
6.2	Representação esquemática do modelo geométrico utilizado neste trabalho. . . . .	53
6.3	Modelo de elementos finitos da massa de impacto. . . . .	53
6.4	Ponta e gume de facas reais analisados ao microscópio ótico [69]. . . . .	55
6.5	Modelo de elementos finitos da faca PSDB/S1/G. . . . .	56
6.6	Representação esquemática do modelo numérico de um tecido com recurso a hastes unidimensionais [72]. . . . .	56
6.7	Modelo de elementos finitos do tecido de Kevlar-29 <sup>®</sup> . . . . .	59
6.8	Discretização do modelo numérico da cortiça. . . . .	60
6.9	Representação esquemática da técnica de duplicação e separação de nós. . . . .	64
7.1	Sequência do ensaio de validação do tecido com impacto de uma esfera com velocidade $v_z = 20$ m/s. . . . .	70
7.2	Sequência do ensaio de validação do tecido com impacto de uma esfera com velocidade $v_z = 100$ m/s. . . . .	70
7.3	Velocidade da faca em função do tempo de ensaio, com variação do coeficiente de atrito entre <i>yarns</i> e faca- <i>yarns</i> . . . . .	72
7.4	Comparação dos resultados obtidos para cada coeficiente de atrito, em termos de escorregamento do tecido pela faca, para o instante final de cada ensaio. . . . .	73
7.5	Representação da distorção excessiva de um elemento como resultado de instabilidades numéricas. . . . .	74
7.6	Sequência de impacto do ensaio de seleção da energia de impacto padrão. . . . .	75

7.7	Representação da configuração do alvo utilizada no estudo com 8 camadas de tecido alinhadas. . . . .	76
7.8	Ponto de impacto da faca no tecido. . . . .	76
7.9	Velocidade vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferente número de camadas de tecido no alvo. . . . .	77
7.10	Deslocamento vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferente número de camadas de tecido no alvo. . . . .	78
7.11	Aceleração vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferente número de camadas de tecido no alvo. . . . .	79
7.12	Redução de velocidade da faca em relação ao ensaio de referência (duas camadas de tecido) para o instante $t = 15$ ms. . . . .	80
7.13	Distribuição de tensões (a) $\sigma_x$ e (b) $\sigma_y$ . . . . .	80
7.14	Representação da configuração do alvo utilizada no estudo com 8 camadas desencontradas. . . . .	81
7.15	Velocidade da faca em função do tempo de ensaio, com variação do número de camadas de tecido no alvo, para camadas alinhadas (A) e desencontradas (D). . . . .	81
7.16	Deslocamento vertical da faca em função do tempo, com variação do número de camadas de tecido no alvo, para camadas alinhadas (A) e desencontradas (D). . . . .	82
7.17	Acelerações da faca em função do tempo, com variação do número de camadas de tecido no alvo, para camadas alinhadas (A) e desencontradas (D). . . . .	83
7.18	Exemplo da configuração do alvo após a introdução de MAC, numa configuração K-C-K-C-K. . . . .	84
7.19	Velocidade vertical da faca em função do tempo de ensaio para uma espessura total de MAC de 1 mm. . . . .	85
7.20	Penetração da faca em função do tempo de ensaio para uma espessura total de MAC de 1 mm. . . . .	86
7.21	Acelerações verticais da faca em função do tempo de ensaio para os ensaios com espessura total de MAC de 1 mm. . . . .	87
7.22	Distribuição de tensões (a) $\sigma_x$ e (b) $\sigma_y$ no tecido da face de ataque, no ensaio K-C-K com 1 mm de MAC ( $t = 14$ ms). . . . .	87
7.23	Distribuição de tensões (a) $\sigma_x$ e (b) $\sigma_y$ da placa de cortiça, no ensaio K-C-K com 1 mm de MAC ( $t = 14$ ms). . . . .	88
7.24	Velocidade vertical da faca em função do tempo de ensaio para uma espessura total de MAC de 0.6 mm. . . . .	89
7.25	Deslocamento vertical da faca em função do tempo de ensaio para os ensaios com espessura total de MAC de 0.6 mm. . . . .	90
7.26	Acelerações verticais da faca em função do tempo de ensaio para os ensaios com espessura total de MAC de 0.6 mm. . . . .	91
7.27	Velocidade vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferentes configurações do alvo. . . . .	92
7.28	Aceleração vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferentes configurações do alvo. . . . .	92
7.29	Deslocamento vertical da faca em função do tempo de ensaio, para diferentes configurações do alvo. . . . .	93

7.30	Evolução da velocidade e deslocamento da faca para alvos com 3 camadas de Kevlar-29 <sup>®</sup> , com e sem inclusão de cortiça. . . . .	93
7.31	Evolução da velocidade e deslocamento da faca para alvos com 2 camadas de Kevlar-29 <sup>®</sup> , com e sem inclusão de cortiça. . . . .	94

# Bibliografia

- [1] I. Horsfall, *Stab resistant body armour*. Tese de Doutorado, Cranfield University, 2000.
- [2] Richard A. Scott, *Textiles for protection*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [3] J. Shumate, “Wikimedia Foudation”, [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ancient\\_Greece\\_hoplite\\_with\\_his\\_hoplon\\_and\\_dory.jpg?uselang=pt](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ancient_Greece_hoplite_with_his_hoplon_and_dory.jpg?uselang=pt), 2006.
- [4] U. Dodo, “Wikimedia Foudation”, [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Bayeux\\_haubert.JPG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Bayeux_haubert.JPG), 2005.
- [5] G. R. Watson, *The Roman Soldier*. England: Cornel University Press, 1969.
- [6] “Wikimedia Foudation”, [http://en.wikipedia.org/wiki/Bulletproof\\_vest#mediaviewer/File:Japanese\\_World\\_War\\_II\\_bulletproof\\_vest.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Bulletproof_vest#mediaviewer/File:Japanese_World_War_II_bulletproof_vest.jpg), 2014.
- [7] “Viking Tactics - Germany”, <http://www.vikingtactics.de/TYR-Tactical/Balistischer-Schutz-Tragesysteme/TYR-LWAS.html>, 2014.
- [8] E. K. Chadwick, A. C. Nicol, J. V. Lane e T. G. Gray, “Biomechanics of knife stab attacks”, *Forensic science international*, vol. 105, pág. 35–44, Out. 1999.
- [9] “Crime in the United States”, Relatório Técnico, US Department of Justice: Federal Bureau of Investigation, 2011.
- [10] G. Berman, “Knife crime statistics”, 2012.
- [11] X. Chen, F. Zhu e G. Wells, “An analytical model for ballistic impact on textile based body armour”, *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, pág. 1508–1514, Fev. 2013.
- [12] B. Gu, “Analytical modeling for the ballistic perforation of planar plain-woven fabric target by projectile”, *Composites Part B: Engineering*, vol. 34, pág. 361–371, Jun. 2003.
- [13] L. M. Bresciani, A. Manes e M. Giglio, “Analytical and numerical models for ballistic impacts against plain-woven fabrics with composite fibers and polymeric matrix”, em *LWAG Symposium and Industry focus*, (Brussels), 2013.
- [14] J. G. Hetherington, “Energy and momentum changes during ballistic perforation”, *International Journal of Impact Engineering*, pág. 319–337, 1996.

- [15] J. D. Walker, “Constitutive model for fabrics with explicit static solution and ballistic limit”, em *18th International Symposium on Ballistics*, (San Antonio, Texas), 1999.
- [16] P. K. Porwal e S. L. Phoenix, “Modeling system effects in ballistic impact into multi-layered fibrous materials for soft body armor”, *International Journal of Fracture*, pág. 217–249, 2005.
- [17] N. C. K. Naik, P. Shorao e B. C. K. Reddy, “Ballistic impact behavior of woven fabric composites: formulation”, *International Journal of Impact Engineering*, pág. 1521–1552, 2006.
- [18] B. A. Cheeseman e T. A. Bogetti, “Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates”, *Composite Structures*, vol. 61, pág. 161–173, Jul. 2003.
- [19] Y. Duan, M. Keefe, T. Bogetti e B. Cheeseman, “Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric”, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 31, pág. 996–1012, Set. 2005.
- [20] S.-X. Sha, Y. Chen e X.-Y. Liu, “Finite-element simulation of Kevlar yarns and fabrics in assessing its mechanical protective performance under projectile impact loading”, *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, vol. 3, pág. 111–116, Set. 2010.
- [21] M. Rao, G. Nilakantan, M. Keefe, B. Powers e T. Bogetti, “Global/local modeling of ballistic impact onto woven fabrics”, *Journal of Composite Materials*, vol. 43, pág. 445–467, Jan. 2009.
- [22] C. T. Lim, V. B. C. Tan e C. H. Cheong, “Perforation of high-strength double-ply fabric by varying shaped projectiles.”, *International journal of impact engineering*, 2002.
- [23] V. B. C. Tan, C. T. Lim e C. H. Cheong, “Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry”, *International journal of impact engineering*, 2003.
- [24] H. Talebi, S. Wong e A. Hamouda, “Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric”, *Composite Structures*, vol. 87, pág. 314–320, Fev. 2009.
- [25] L. Wang, S. Zhang, W. Gao e X. Wang, “FEM analysis of knife penetration through woven fabrics”, *Computer modeling in engineering sciences*, vol. 20, n. 1, pág. 11–20, 2007.
- [26] L. Wang, S. Zhang, W. M. Gao e X. G. Wang, “Finite Element Simulation of Yarn Breakage During Knife Penetration of Woven Fabrics”, em *8th international conference on computational structures technology*, 2006.
- [27] Kirk Rice, “Stab Resistance of Personal Body Armor - 0115.00”, Relatório Técnico, National Institute of justice, Washington, DC, 2000.
- [28] “Body Armour UK”, [http://www.stabproofvest.co.uk/html/uk\\_stab.html](http://www.stabproofvest.co.uk/html/uk_stab.html), 2007.



- [29] J. Croft e D. Longhurst, *HOSDB Body Armour Standards for UK Police Part 1: General Requirements*. N. 39, 2007.
- [30] J. Croft e D. Longhurst, *HOSDB Body Armour Standards for UK Police Part 3: Knife and Spike Resistance*. N. 39, 2007.
- [31] F. K. Ko, *3-D Textile Reinforcements In Composite Materials*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, Set. 1999.
- [32] A. R. Horrocks e S. C. Anand, *Handbook of Technical Textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2000.
- [33] “DuPont - Industrial Gloves”, <http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar/products/gloves-kevlar.html>, 2014.
- [34] M. Sherburn, *Geometric and Mechanical Modelling of Textiles*. Tese de Doutorado, The University of Nottingham, 2007.
- [35] J. Koster, *Handloom construction - A Practical Guide for the Non-Expert*. Arlington: Volunteers in Technical Assistance Inc, 1979.
- [36] M. F. S. F. de Moura, A. B. de Morais e A. G. Magalhães, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Porto: Publindustria, 2006.
- [37] S. Adanur e T. Liao, “3D modeling of textile composite preforms”, *Composites Part B: Engineering*, vol. 29, pág. 787–793, Nov. 1998.
- [38] A. E. Bogdanovich, “Advancements in manufacturing and applications of 3-D woven preforms and composites”, em *16th International Conference on Composite Materials*, (Kyoto), 2007.
- [39] A. E. Bogdanovich e M. H. Mohamed, “Three-dimensional reinforcements for composites”, *SAMPE Journal*, pág. 8–28, 2009.
- [40] F. T. Pierce, “The geometry of cloth structure”, *Journal of the Textile Institute*, 1937.
- [41] J. HU, *Structure and mechanics of woven fabrics*. Cambridge: Woodhead publishing in textiles, 2004.
- [42] A. Kemp, “An extension of Peirce’s cloth geometry to the treatment of nonlinear threads”, *Journal of the Textile Institute*, 1958.
- [43] J. W. S. Hearle e W. J. Shanaham, “An Energy Method for Calculations in Fabric Mechanics”, *Journal of the Textile Institute*, 1978.
- [44] B. D. Tanner, J. A. Fitzgerald e B. R. Phillips, “The Kevlar story - an advanced materials case study”, vol. 76, n. 5, pág. 1019–1023, 1989.
- [45] S. Erik e C. Daniel, “The use of poly-paraphenylene terephthalamide (Kevlar) in personal body armor”, Relatório Técnico, University of Pittsburgh, Pittsburgh, 2012.

- [46] “Wikimedia Foudation”, [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Kevlar\\_chemical\\_structure\\_H-bonds.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Kevlar_chemical_structure_H-bonds.png), 2005.
- [47] E. G. Chatzi e J. L. Koenig, “Morphology and structure of Kevlar fibers: A review”, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 26, pág. 229–270, Set. 1987.
- [48] G. Blankenhorn, K. Schweizerhof e H. Finckh, “Improved Numerical Investigations of a Projectile Impact on a Textile Structure”, em *4th European LS-DYNA Users Conference*, vol. 49, pág. 7–14.
- [49] I. D. Caminos, “Friction and wear behaviour of Kevlar fabrics”, *Journal of Materials Science*, vol. 8, pág. 1305–1311, 1993.
- [50] “Auto Motor und Sport”, [http://www.auto-motor-und-sport.de/bilder/pirelli-reifen-mischungen-2013-6631557.html?fotoshow\\_item=3](http://www.auto-motor-und-sport.de/bilder/pirelli-reifen-mischungen-2013-6631557.html?fotoshow_item=3), 2013.
- [51] “Canoe and Kayak - Boat Book Wenonah”, <http://www.canoekayak.com/gear/sacred-crafts-wenonah/>, 2014.
- [52] J. Sousa-Martins, *Capacidade de proteção contra ondas de choque de choque de sistemas multi-camada incorporando materiais celulares*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2012.
- [53] J. Sousa-Martins, D. Kakogiannis, F. Coghe, B. Reymen e F. Teixeira-Dias, “Behaviour of sandwich structures with cork compound cores subjected to blast waves”, *Engineering Structures*, vol. 46, pág. 140–146, Jan. 2013.
- [54] M. A. Fortes, M. E. Rosa e H. Pereira, *A Cortiça*. IST Press, 2004.
- [55] M. Paulino e F. Teixeira-Dias, “An energy absorption performance index for cellular materials-development of a side-impact cork padding”, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 16, Maio 2011.
- [56] L. Gil, “Cork composites: A review”, *Materials*, vol. 2, pág. 776–789, Jul. 2009.
- [57] S. P. Silva, M. a. Sabino, E. M. Fernandes, V. M. Correlo, L. F. Boesel e R. L. Reis, “Cork: properties, capabilities and applications”, *International Materials Reviews*, vol. 50, pág. 345–365, Dez. 2005.
- [58] A. V. F. Azevedo, “Desempenho balístico de sistemas de proteção com núcleos de MAC”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2012.
- [59] J. S. S. Lopes, R. A. S. Moreira e J. Dias Rodrigues, “Experimental identification of dynamic properties of cork compound”, em *5th international conference on mechanics and materials in design*, pág. 1–10, 2006.
- [60] Robert Hooke, *Micrographia: or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses*. Royal Society of London, 1665.
- [61] J. Sousa-Martins, D. Kakogiannis, F. Coghe, B. Reymen e F. Teixeira-Dias, “Response of cork compounds subjected to impulsive blast loads”, *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 206, pág. 61–70, Maio 2012.

- [62] J. V. Natividade, *Subericultura*. Lisboa: Direção-Geral das Florestas, 1990.
- [63] B. Soares, L. Reis e L. Sousa, “Cork composites and their role in sustainable development”, *Procedia Engineering*, vol. 10, pág. 3214–3219, Jan. 2011.
- [64] L. J. Gibson e M. F. Ashby, “Cellular solids: Structure and properties”, 1987.
- [65] H. Pereira, *Cork: Biology, Production and Uses*. Elsevier, 2007.
- [66] Amorim Cork Composites, “CORECORK technical data”, 2012.
- [67] F. Teixeira-Dias, J. Pinho-da Cruz, R. A. F. Valente e R. J. A. de Sousa, *Método dos Elementos Finitos - Técnicas de simulação numérica em engenharia*. Lidel - edições técnicas, 2010.
- [68] E. Vokshi, “Experimental Investigation and Development of Finite Element Model for Knife and Spike Impact”, Dissertação de Mestrado, Arizona State University, 2012.
- [69] A. N. Annaidh, M. Cassidy, M. Curtis, M. Destrade e M. D. Gilchrist, “A combined experimental and numerical study of stab-penetration forces.”, *Forensic science international*, vol. 233, pág. 7–13, Dez. 2013.
- [70] D. Roylance e S. S. Wang, “Penetration Mechanics of Textile Structures: Influence of non-linear viscoelastic relaxation”,
- [71] H. H. Billon e D. J. Robinson, “Models for the ballistic impact of fabric armour”, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 25, n. April 1999, pág. 411–422, 2001.
- [72] V. Shim, V. Tan e T. Tay, “Modelling deformation and damage characteristics of woven fabric under small projectile impact”, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 16, pág. 585–605, Ago. 1995.
- [73] A. Tabiei e I. Ivanov, “Computational micro-mechanical model of flexible woven fabric for finite element impact simulation”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 53, pág. 1259–1276, Fev. 2002.
- [74] W. Riedel, E. Straß burger, B. Lexow, H. Nahme e K. Thoma, “Fragment impact on bi-layered light armours experimental analysis, material modeling and numerical studies”, em *19th International Symposium of Ballistics*, pág. 7–11, 2001.
- [75] C. Lim, V. Shim e Y. Ng, “Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor”, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 28, pág. 13–31, Jan. 2003.
- [76] D. A. Shockey, J. W. Simons e D. C. Erlich, “Improved Barriers to Turbine Engine Fragments : Interim Report II”, Relatório Técnico, 1997.
- [77] M. Grujicic, W. C. Bell, T. He e B. a. Cheeseman, “Development and verification of a meso-scale based dynamic material model for plain-woven single-ply ballistic fabric”, *Journal of Materials Science*, vol. 43, pág. 6301–6323, Ago. 2008.

- [78] H. Lin, A. Long, M. Sherburn e M. Clifford, “Modelling of mechanical behaviour for woven fabrics under combined loading”, Abr. 2008.
- [79] O. Döbrich, T. Gereke, D. Ing e C. Cherif, “Drape Simulation : Textile Material Model for Correct Property Reproduction to Improve the Preform Development Process of Fiber-Reinforced Structures”, em *12th International LS-DYNA Users Conference*, pág. 1–10, 2012.
- [80] “LS-DYNA Keyword user’s manual”, 2012.
- [81] J. O. Hallquist, “LS-DYNA Theory Manual”, 2006.
- [82] F. Dogan, H. Hadavinia, T. Donchev e P. S. Bhonge, “Delamination of impacted composite structures by cohesive zone interface elements and tiebreak contact”, *Central European Journal of Engineering*, vol. 2, pág. 612–626, Ago. 2012.
- [83] K. Gordnian, H. Hadavinia, P. Mason e E. Madenci, “Determination of fracture energy and tensile cohesive strength in Mode I delamination of angle-ply laminated composites”, *Composite Structures*, vol. 82, pág. 577–586, Fev. 2008.
- [84] Y. Guo e C.-T. Wu, “EFG and XFEM Cohesive Fracture Analysis Methods in LS - DYNA”, em *LS-DYNA Seminar*, (Stuttgart), 2010.
- [85] C. Menna, D. Asprone, G. Caprino, V. Lopresto e A. Prota, “Numerical simulation of impact tests on GFRP composite laminates”, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 38, pág. 677–685, Ago. 2011.
- [86] A. Gasser, P. Boisse e S. Hanklar, “Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests”, *Computational Materials Science*, vol. 17, pág. 7–20, Jan. 2000.
- [87] A. P. G. Caçoilo, “Análise de traumas induzidos por impactos balísticos em PASGT”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2014.