



**Daniel Filipe da Silva
Gonçalves**

**Segurança passiva de capacetes rodoviários
utilizando novos materiais**



**Daniel Filipe da Silva
Gonçalves**

**Segurança passiva de capacetes rodoviários
utilizando novos materiais**

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

o júri

presidente

Professor Doutor Robertt Ângelo Fontes Valente
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Doutora Celina Pires Gameiro
Engenheira de Desenvolvimento da Bosch Tecnologia S.A.

Professor Doutor José Luis Pérez Castellanos
Professor Titular do Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras da Universidade Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior

Professor Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa
Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Professor Doutor Filipe Teixeira-Dias e ao Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa, professores e orientadores, com quem tive o prazer de trabalhar e que me ofereceram os seus conhecimentos e amizade. Pelo apoio incansável e pela disponibilidade constante que ofereceram.

À Clélia por estar sempre ao meu lado, pela compreensão e apoio.

Aos meus pais e irmã, e a toda a minha família pela força que me transmitiram em cada passo ao longo do meu percurso académico.

Aos meus colegas, pela força e apoio, e por todos os dias passados na vossa companhia.

À NEXX, fábrica de capacetes, e em particular ao engenheiro Carlos Freitas e ao engenheiro Hélder Loureiro, por todo o material fornecido e por toda a disponibilidade demonstrada desde o primeiro contacto.

Ao Eng. Vitor, por todas as “pequenas aulas” e pela disponibilidade constante demonstrada.

A todos o meu,
Muito Obrigado.

palavras-chave

Segurança passiva, absorção de energia, materiais celulares, impacto, cortiça, simulação numérica, elementos finitos, capacetes rodoviários.

resumo

Neste trabalho procura-se explorar a capacidade da cortiça de actuar como material dedicado à absorção de energia de impacto, no âmbito da segurança passiva em capacetes rodoviários. Estuda-se numericamente a viabilidade da implementação de *padding* em cortiça micro-aglomerada em capacetes rodoviários, em particular em capacetes de motas, através de simulações numéricas de testes de impacto, nos pontos considerados pela norma europeia ECE-R.22/05.

O poliestireno expandido (EPS) é um material largamente utilizado, e com excelentes desempenhos, em aplicações de absorção de energia. Contudo, uma vez deformado, este não apresenta retorno elástico, o que significa que a sua capacidade de absorção de energia fica bastante reduzida após o primeiro impacto.

Por outro lado, a cortiça é um material caracterizado por ter uma boa capacidade de absorção de energia, e com retorno elástico quase total, o que significa que a sua capacidade de absorção de energia é quase inalterável.

Numa parte inicial, cria-se um modelo numérico a fim de verificar se a escolha dos modelos numéricos de comportamento adoptados para a modelação dos materiais em estudo, eram adequados.

Os resultados obtidos mostram que o modelo escolhido, quer para o EPS quer para a cortiça micro-aglomerada consegue modelar adequadamente o comportamento real do material.

Na segunda fase deste trabalho, desenvolve-se um modelo de capacete rodoviário simplificado, e este é submetido a impactos, em diversos pontos, conforme especificado na norma europeia. Estuda-se numericamente a aplicação de cortiça micro-aglomerada no *padding* de absorção de energia do capacete. Confrontam-se os resultados obtidos, no que diz respeito à aceleração do centro de gravidade do modelo da cabeça, valores de HIC (critério de lesão) e energia cinética, com *padding* em EPS e em micro-aglomerado de cortiça. Verifica-se se os valores de aceleração máxima do centro de massa do modelo da cabeça e HIC estão dentro dos limites estabelecidos pela norma reguladora.

keywords

Passive safety, energy absorption, cellular materials, impact, cork, numeric simulation, finite element, road helmet.

abstract

The efficiency of cork as a material dedicated to energy absorption under impact loading is studied in the present work, bearing in mind its application in the increase of passive safety of road helmets. The viability of the application of a micro-agglomerate cork padding on road helmets, especially in motorcycle helmets, is studied using finite element simulations of impact tests, considering the specifications of the European Standard ECE-R.22/05.

Expanded polystyrene (EPS) is a widely used material, with excellent results in energy absorption applications. However, after the first impact, its capacity for energy dissipation is significantly decreased, due to the almost total absence of elastic springback. Moreover, cork is a material characterized by having both a good energy absorption capability and springback behaviour, which means that its capacity to absorption energy is almost unchanged after the first impact.

A full three-dimensional numerical model is developed and used to verify if the constitutive material models involved in this study are appropriate. Results show that the chosen models can adequately reproduce the real behaviour of EPS and micro-agglomerate cork.

In the second part of this work, a three-dimensional road helmet model was developed and submitted to impact on different points, as specified on the European Standard. The application of micro-agglomerate cork in the protective padding of the helmet was numerically studied and the results, concerning the gravity centre of the head model, HIC values (injury criterion) and kinetic energy, using a protective padding with EPS or micro-agglomerate cork were thoroughly confronted and discussed. The maximum acceleration values of the gravity centre of the head model and the HIC values were verified to be within the established limits of the regulatory standard.

Conteúdo

I	Enquadramento e Objectivos	1
1	Enquadramento	3
1.1	Capacete: elemento de protecção	3
1.1.1	Design de capacetes: antes e agora	3
1.1.2	Eficácia dos actuais capacetes rodoviários	5
1.1.3	Estado de arte	9
1.2	Normas de testes em capacetes rodoviários	17
1.2.1	Introdução	17
1.2.2	História	17
1.2.3	Sumário das normas de testes de capacetes	18
1.2.4	Discussão	24
1.3	Critérios de lesão	25
1.3.1	Critérios de lesão baseados em acelerações translacionais	25
1.3.2	Critérios de lesão baseados na combinação das acelerações translacionais e rotacionais da cabeça	27
1.3.3	Critérios de lesão baseados em tensões e deformações	29
1.3.4	Discussão sobre os critérios de lesão da cabeça	30
1.4	A cortiça: um material celular natural	31
1.4.1	Origem e crescimento	31
1.4.2	Produção, transformação e comercialização de cortiça	32
1.4.3	Estrutura da cortiça	34
1.4.4	Estado de arte	38
2	Objectivos e Guia de Leitura	43
2.1	Objectivos	43
2.2	Guia de leitura	43
II	Caracterização Mecânica dos Materiais	45
3	Ensaio de Caracterização	47
3.1	Introdução	47
3.2	Configuração dos ensaios mecânicos	47
3.2.1	Modelação em Abaqus™	47
3.3	Comportamento mecânico do EPS	49
3.4	Comportamento mecânico da cortiça micro-aglomerada	51
3.5	Resultados e conclusões	53
3.5.1	Poliestireno expandido	53
3.5.2	Cortiça micro-aglomerada	55

III	Modelação Numérica	57
4	Procedimentos e métodos	59
4.1	Método dos Elementos Finitos	59
4.2	Programa de simulação Abaqus™	61
4.3	Modelação do ensaio	61
4.3.1	Modelação 3D	62
4.4	Modelação em Abaqus™	65
4.4.1	Modelo de elementos finitos do casco	65
4.4.2	Modelo de elementos finitos do <i>padding</i> e da coroa de protecção	66
4.4.3	Modelo em elementos finitos do modelo da cabeça	66
4.4.4	Definição de contactos e condições de impacto	66
5	Resultados e Discussão	71
IV	Discussão e Conclusões	83
6	Discussão e Conclusões Gerais	85
6.1	Conclusões gerais	85
6.2	Trabalhos futuros	87

Parte I

Enquadramento e Objectivos

Capítulo 1

Enquadramento

Neste primeiro capítulo apresentam-se os tópicos envolvidos e tratados durante o desenvolvimento da dissertação e explicam-se conceitos relativos à protecção contra impacto e absorção de energia. Referem-se alguns materiais tipicamente utilizados em situações de impacto e descreve-se mais especificamente a cortiça e as suas potencialidades. Inclui-se a revisão bibliográfica referente a trabalhos de investigação realizados que se contextualizem neste projecto.

1.1 Capacete: elemento de protecção

1.1.1 Design de capacetes: antes e agora

O Homem sentiu necessidade de proteger a sua cabeça, usando capacetes, muito antes dos mecanismos de lesão serem conhecidos. A maneira como estes capacetes eram desenvolvidos estava dependente, e ainda está, da sua aplicação. Já no Século XV a.C., os capacetes eram um meio efectivo de proteger a cabeça. A figura 1.1 mostra um capacete datado do Século V a.C., fabricado em bronze e obviamente desenhado para proteger contra a penetração de objectos durante um combate. Apenas no final do Século XIX foi descoberto que lesões graves na cabeça poderiam ocorrer sem qualquer penetração. Estas lesões eram causadas por acelerações de curta duração que actuavam na cabeça e nos seus constituintes [1], e são as mais perigosas formas de lesão para os motociclistas.

Os primeiros capacetes rodoviários desenvolvidos eram constituídos por duas partes: uma cobertura em couro e um *padding* de absorção de choque. Mais tarde, a cobertura de couro foi substituída por um casco em plástico. A sua função não era apenas de prevenção contra a penetração, mas também distribuir as forças por uma área maior. A figura 1.2 ilustra os componentes de um capacete integral moderno, que geralmente consiste em quatro partes principais:

1. *Padding* de conforto;
2. *Padding* de protecção;
3. Casco;
4. Sistema de retenção.



Figura 1.1: Capacete Coríntiano do Século V a.C.

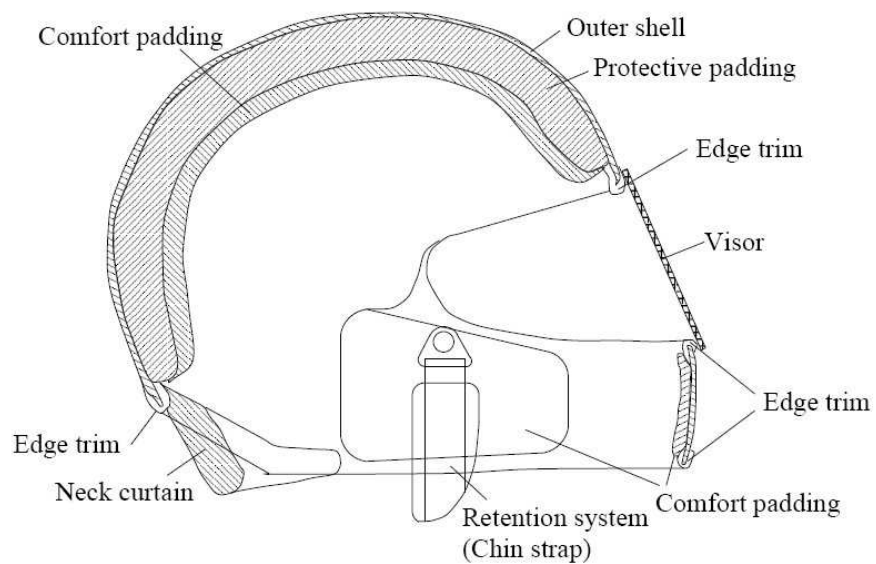


Figura 1.2: Corte transversal de um capacete integral de moto [2].

O objectivo do *padding* de conforto é aumentar o conforto para o motociclista e promover um bom ajustamento à cabeça. Este, normalmente consiste em espumas de polierutano ou de policloreto de vinilo (PVC) caracterizadas por terem baixa densidade, flexibilidade e células abertas, e são geralmente uniformes [3]. O *padding* protector, ou *padding* de impacto, é o principal componente para absorção de choque do capacete. É normalmente feito em espuma de poliestireno expandido (EPS). A espessura deste componente é limitada pelos requisitos aerodinâmicos e do design do capacete e varia normalmente entre 25 e 40 mm. A densidade da espuma de EPS, aplicada em capacetes rodoviários, varia aproximadamente entre 30 e 40 kg/m³. Por sua vez, o casco tem três funções principais: (a) distribuir a força de impacto, (b) prevenir a penetração e (c) prevenir lesões resultantes da abrasão ao longo de superfícies rugosas. São geralmente usados três tipos de material em cascos de motas: Policarbonato (PC), Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS) ou Fibras de Plástico Reforçadas (FRP). O casco de FRP, mais rígido, é geralmente usado em combinação com espumas de EPS de baixa-densidade, enquanto os cascos de ABS e PC, menos rígidos, são compensados pela aplicação de espumas mais rígidas de EPS de alta-densidade. Geralmente as capacidades de absorção de choque de um capacete são função do casco e do forro protector. Por último, o sistema de retenção do queixo é usado para manter o capacete na posição correcta, antes e durante o impacto.

1.1.2 Eficácia dos actuais capacetes rodoviários

Os motociclistas, que correspondem à esmagadora maioria dos utilizadores de capacetes rodoviários, são os mais vulneráveis entre todos os utentes da estrada. Nos acidentes de carro, os ocupantes são protegidos pelos sistemas de cintos de segurança, *airbags*, *padding*s interiores dos carros e pelo próprio corpo do carro. Os motociclistas envolvidos em acidentes de viação são muito mais vulneráveis do que os ocupantes de carros, dado que a única protecção lhes é oferecida é o capacete. Assim, juntamente com os condutores de ciclomoteres, eles têm o risco mais elevado de morrerem num acidente de viação [4, 5]. Otte *et al.* [6] apresentam uma categorização detalhada das lesões, divididas pelas várias partes do corpo, sofridas por motociclistas envolvidos em acidentes de viação. A gravidade das lesões é indicada usando a *Abbreviated Injury Scale* (AIS) que é uma escala de ameaça de vida (figura 1.6).

Tabela 1.1: *Abbreviated Injury Scale*. [7]

AIS Code	Nível de concussão cerebral e de lesão na cabeça
1	Dores de cabeça ou tonturas
2	Inconsciente durante menos de 1 hora - Fractura linear
3	Inconsciente durante 1-6 horas - Fractura com afundamento
4	Inconsciente durante 6-24 horas - Fractura aberta
5	Inconsciente mais de 24 horas - Hematoma grande
6	Não sobrevive

A escala do AIS varia entre 1 e 6, ao qual correspondem lesões leves, AIS 1, e lesões quase sempre fatais, AIS 6. Os resultados de Otte *et al.* [6] são similares aos de outros investigadores de acidentes (ver Harms, 1993 [8]). De acordo com os autores, as partes do corpo que mais frequentemente sofrem lesões são as pernas (39% de todas as lesões), a cabeça (23%) e os braços (19%). Contudo, as lesões na cabeça são geralmente mais sérias (uma média de AIS 2.4) do que as das pernas (AIS 1.9) ou lesões dos braços (AIS 1.5), e representam cerca de 80% das mortes. Para além disso, lesões do sistema nervoso central são geralmente lesões irreversíveis.

A tabela 1.2 mostra as tendencias das mortes de motociclistas, em números absolutos, e a percentagem de todas as mortes na estrada, num período entre 1980-1997, para o número de

Tabela 1.2: Número de mortes em acidentes de motos em vários países [9].

País	Número de mortes					% de todas as mortes na estrada				
	1980	1990	1997	% de mudança		1980	1990	1997	% de mudança	
				1980-90	1990-97				1980-90	1990-97
Austria	106	107	111	+1	+4	7.3	7.2	10.0	-1	-39
Belgica	170	106	125	-38	+18	7.5	5.4	9.2	-24	+70
Dinamarca	59	39	23	-34	-41	8.3	6.2	4.7	-28	-24
Filândia	21	28	8	-38	-71	3.1	4.3	1.8	+13	-58
França	1136	1031	831	-9	-19	8.6	9.2	10.4	+8	+13
Alemanha	1232	769	974	-38	+27	10.5	9.6	11.4	-8	+19
GB	1113	621	492	-44	-21	17.8	11.7	11.9	-34	+2
Italia	822	709	482	-14	-32	9.0	10	7.7	+11	-23
Holanda	130	72	92	-45	+28	6.5	5.2	7.9	-20	+33
Noruega	29	25	27	-14	+8	8.0	7.5	8.9	-6	+19
Espanha	316	793	460	+151	-42	4.8	8.8	8.2	+81	-7
Suécia	43	46	36	+7	-22	5.1	6	6.7	+18	+12
Suíça	139	160	83	+15	-48	11.2	16.8	14.1	+50	-16
Europa*	5316	4502	3744	-15	-17	8.3	8.3	8.7	0	+5
EUA	5079	3173	2084	-38	-34	9.8	7.0	5.0	-29	-29
Total	10395	7675	5828	-26	-24	8.4	8.2	8.4	-2	+2

* 13 países acima.

países em que esta estatística estava disponível. A tabela revela que o número de mortes varia substancialmente ao longo de um longo período de tempo, e entre os diferentes países. No geral a tendência da Europa e do EUA mostra um decréscimo no número de mortes (colunas 5 e 6). Contudo, mortes associadas a outros utentes da estrada estão a baixar mais rapidamente. Assim as mortes de motociclistas aumentou (ligeiramente) em relação ao total de mortes dos utentes da estrada (colunas 10 e 11). Em média, as mortes de motociclistas representam cerca de 8% do total de mortes na estrada. Também, em 1990, a taxa de mortes, associadas a motos, por veículo na Europa foi 4 vezes maior do que para os carros [4]. Este valor é uma subestimação do alto risco das motos, uma vez que não tem em conta a menor distância que os motociclistas percorrem em relação aos carros. Por cada 1.6 km viajados, a taxa de mortes em motos é 18 vezes mais elevada do que em veículos de passageiros [10]. A tabela mostra também um rápido abaixamento do número de mortes nos EUA comparado à Europa. Isto poderá dever-se ao facto de que, actualmente, nos EUA, quase todos os estados têm uma lei que obriga o uso de capacete, enquanto que em 1980 não havia nenhuma lei nesse sentido. Ainda assim, na Europa, onde as leis sobre os capacetes estão em vigor desde 1975, o número de mortes é maior do que nos EUA. Para além disso, o número de mortes como percentagem de todas as mortes na estrada aumentou no período entre 1990 comparado com 1997. Isto resulta, provavelmente, das diferentes situações de tráfego na Europa comparado aos EUA, especialmente nos países do sul da Europa, onde o tráfego é mais caótico.

Na tabela 1.3, representa-se a evolução, em Portugal, do número de mortes e feridos graves em acidentes envolvendo veículos de duas rodas [5]. Pode constatar-se que, de uma maneira geral, quer o número de mortes quer o número de feridos graves tiveram uma diminuição significativa ao longo dos últimos anos. Assim, isto poderá querer dizer que, as estruturas que protegem o utilizador deste tipo de veículos são cada vez mais eficazes, levando assim a uma diminuição de lesões e de mortes.

A figura 1.3 diz respeito a Portugal, e representa o número de meios de transporte de duas rodas presentes em acidentes bem como os feridos graves e mortes de condutores deste tipo de meios de transporte. Como se pode constatar, uma grande percentagem de veículos de duas rodas

Tabela 1.3: Número de vítimas mortais e feridos graves de acidente envolvendo utentes de duas rodas em Portugal [5].

Ano	Utentes de duas rodas*	
	Vítimas mortais	Feridos graves
1998	488	2558
1999	444	2218
2000	383	1904
2001	362	1522
2002	324	1141
2003	325	1213
2004	265	1092
2005	258	985
2006	205	881
2007	189	808

* Ciclomotores e motociclos.

estiveram envolvidos em acidentes no ano de 2007. Quando analisamos os diferentes gráficos da figura 1.3, e tendo em conta a percentagem de veículos presentes em acidentes de viação, verificamos que a percentagem de feridos graves e de mortos em condutores deste tipo de veículos é muito elevado. Isto deve-se ao facto de a única estrutura que protege um condutor de veículos de duas rodas, como já foi referido, é o capacete, enquanto que nos veículos ligeiros e pesados os condutores têm os sistemas de cintos de segurança, *airbags* e a própria estrutura do veículo a protegê-los. Assim, como o único componente que protege o utilizador de veículos de duas rodas, é o capacete, torna-se imperial o melhoramento contínuo destas estruturas.

Para determinar, de forma estatística, a eficiência dos capacetes em prevenir as lesões na cabeça ou reduzir a gravidade das mesmas, é necessário investigar as lesões sofridas por um conjunto de vítimas em que há um número significativo que usavam e que não usavam capacete. Na maior parte dos países ocidentais Europeus a taxa de utilização de capacete é de 80% desde os meados dos anos 60. Portanto dados adequados para determinar a eficiência dos capacetes na Europa apenas estão disponíveis antes desse período, mas dados mais recentes estão disponíveis nos EUA.

Goldstein [11] estudou exaustivamente a eficiência dos capacetes. A maioria desses estudos mostram um aumento da taxa de mortalidade depois da anulação da lei. Contudo, as diferenças entre os estudos são bastante grandes (taxas de mortalidade variam entre 10% até 63%). Alguns estudos não mostram uma diferença significativa, mas nenhum dos estudos mostra uma diminuição da taxa de mortalidade. Uma conclusão típica é que a não-utilização do capacete é responsável por estas diferenças. Contudo, tendências temporais tal como a média de idades e inexperiência dos proprietários das motas, maior média de quilómetros percorridos por ano e motas mais rápidas podem também contribuir para estes resultados. O estudo de Evans e Frick [12] é o único estudo que é compensado por estas tendências temporais. Estes autores usaram o método de comparação de par duplo¹ onde um dos ocupantes da moto, quer o condutor quer o passageiro, é usado como controlador para o outro ocupante, em acidentes de moto envolvendo um condutor masculino e um passageiro masculino ou feminino e onde haja pelo menos uma morte. Este estudo concluiu que condutores que usam capacete têm menos 27% de probabilidade de morrer num acidente, quando comparado com condutores que não usam capacete.

O estudo de Hurt Jr. *et al.* [13] é o mais referenciado sobre acidentes e aspectos de segurança

¹Do inglês: *Double Pair Comparison Method*.

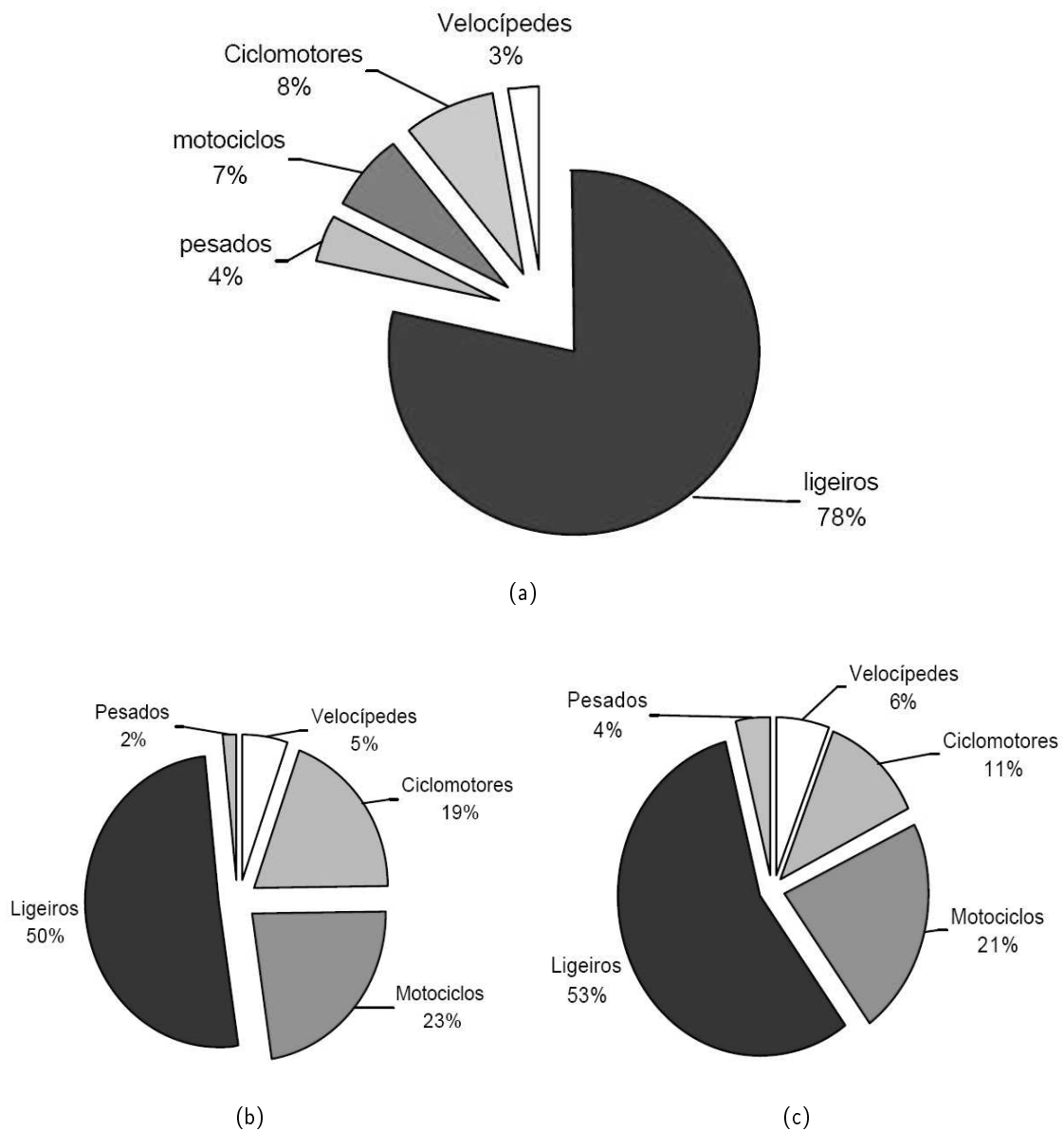


Figura 1.3: (a) - Veículos intervenientes em acidentes em Portugal. (b) - Condutores feridos graves segundo a categoria de veículo em Portugal. (c) - Condutores mortos segundo a categoria de veículo em Portugal [5].

de motos. Este estudo é baseado em dados recolhidos de investigações profundas, no local onde se deu o acidente, de 900 acidentes de motos na área de Los Angeles. Eles encontraram uma taxa de mortalidade de 3.5% para utilizadores de capacetes e 8.2% para não-utilizadores de capacetes envolvidos em acidentes. Então, de acordo com este estudo, a utilização do capacete reduz em 57% a possibilidade dos motociclistas serem mortos em acidentes, que é mais do dobro dos resultados obtidos por Evans e Frick [12]. Uma larga diferença entre as taxas de mortalidade dos vários estudos pode ter sido causada pelo método de investigação adoptado. Por exemplo, Hurt Jr. *et al.* [13], que realizaram investigações aprofundadas no local do acidente, podem ter sido influenciados devido a falta de documentação do acidente e por acidentes sem lesões. Apesar de cada método de investigação ter as suas desvantagens, há uma conclusão que se pode retirar: a utilização de capacete é um meio eficaz de proteger a cabeça.

1.1.3 Estado de arte

Muitos investigadores têm vindo a estudar o *design* e os testes normalizados dos capacetes, no que diz respeito ao seu desempenho nos teste de absorção de energia. Estes estudos podem ser divididos em três categorias:

- **Modelos experimentais baseados em testes de queda normalizados**, que avalia e compara o desempenho de diferentes capacetes existentes;
- **Modelação numérica de testes de queda normalizados**, que investiga o efeito dos parâmetros do material no desempenho do capacete, utilizando estudos paramétricos;
- **Estudos experimentais baseados em testes de queda modificados**, que investiga o efeito das mudanças de procedimento do teste na avaliação do desempenho do capacete.

Os estudos da primeira e segunda categoria investigam e procuram meios de melhorar a eficiência do capacete, usando as normas existentes (como a ECE-R.22 [2]), enquanto os estudos da última categoria tentam encontrar meios que melhorem as normas em termos de *forças aplicadas*, *avaliação dos testes* e *modelo da cabeça*. Pois, desde que a concepção do capacete continue a guiar-se por essas normas, uma melhoria das mesmas iria levar a uma melhoria da concepção do capacete e por sua vez a um aumento da sua qualidade.

Estudos experimentais baseados em testes de queda normalizados

Beusenberg e Happee [14] usaram testes de queda da norma ECE-R.22, num conjunto (aprovado) de capacetes, para investigar a relação entre os parâmetros de concepção e o seu desempenho, de acordo com vários critérios. Foi dada especial atenção ao casco e às propriedades do material que compunha o *padding* de protecção. Foram avaliados a resultante da aceleração na cabeça, valores de HIC e as forças de reacção na plataforma de impacto durante um impacto frontal. Além disso, foram examinadas a deformação residual no forro protector 24 horas após os testes. Os capacetes existentes podem ser qualificados em duas categorias: capacetes de casco rígido e com um forro protector de baixa densidade (*e.g.* capacetes com casco em policarbonato (PC)) e capacetes com baixa rigidez no casco combinados com um forro protector de alta densidade (*e.g.* capacetes com casco em fibra de plástico reforçada (FRP)). Com isto, foram encontradas diferenças típicas nos seus modos de deformação, como expressa na figura 1.4.

A energia absorvida por capacetes com cascos em FRP é causada pela deformação do forro protector "a partir do interior" e a distribuição das forças é determinada pela compatibilidade das dimensões do forro protector e a forma da cabeça, ao passo que capacetes de PC geralmente apresentam deformações "a partir do exterior" e a distribuição das forças é determinada pela

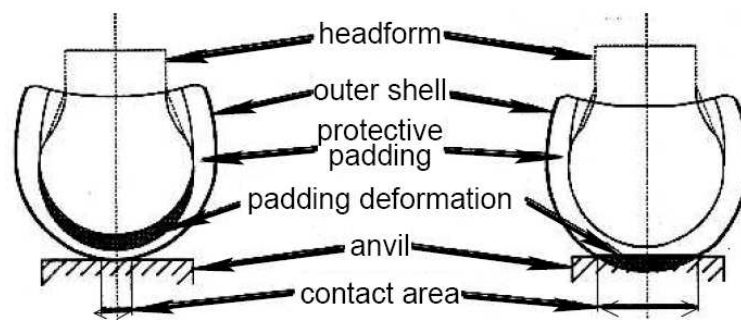


Figura 1.4: Modos de deformação de capacetes com cascos em FRP (esquerda) e PC (direita) [14].

geometria do objecto atingido, bem como pela capacidade de distribuição de forças do material do forro protector. Os capacetes em FRP mostram uma carga máxima e taxa de "inserção" maior, enquanto a distribuição de forças e tempo de duração de impacto são mais favoráveis, comparados aos capacetes PC. A energia total absorvida, por deformação do capacete, são bastante similares para todos os capacetes testados. Os autores não fizeram qualquer afirmação acerca de qual é que oferece melhor protecção, mas, se o total de energia absorvida é a mesma, tende-se a concluir que os capacetes em PC dão maior protecção, uma vez que o tempo de duração de impacto é maior, sendo a taxa de variação de energia menor. Contudo, não está provado que a taxa de variação de energia absorvida seja um bom critério de lesão para lesões provenientes de acidentes de viação. Além disso, um impacto de longa duração implica uma grande deformação do *padding* de protecção (considerando a mesma velocidade de impacto e massa da cabeça), o que significa um maior risco *bottoming-out* (fenómeno em que o forro protector usa todas as suas capacidades de absorção de energia de impacto). Isto leva a que, num segundo impacto, o capacete oferece uma menor protecção, pois a sua capacidade de absorção de energia é menor.

Schuller e Beier [15] investigaram uma amostra de 131 capacetes de motociclistas que estiveram envolvidos em acidentes de viação, no que diz respeito à incidência de lesões na cabeça e material do casco. Foi descoberto que os utilizadores de capacetes em PC pareciam sofrer menos lesões cerebrais e fracturas do crânio do que aqueles que usavam capacetes em ABS e FRP.

A incidência de concussões² cerebrais ligadas a fracturas do crânio é significativamente diferente entre os capacetes em PC e FRP. Para impactos ligeiros, quem usa capacetes em FRP geralmente sofrem concussões ligeiras, concussões cerebrais moderadas e não/ligeiras lacerações. Para os que usam capacetes em PC ou ABS, essas lesões são menos comuns. Os autores não fizeram nenhuma qualificação da gravidade das lesões dentro deste grupo de lesões. Este estudo indica que os capacetes em PC são também melhores a proteger a cabeça em acidentes reais de trânsito do que os capacetes em FRP.

Hopes e Chinn [16] testaram uma variabilidade de combinações de rigidez do casco e de densidade do forro protector. Foram analisados os resultados de testes de queda, realizados de acordo com a norma inglesa [17]. Cada capacete foi testado em 5 pontos de impacto: topo, frontal, lado esquerdo, lado direito e parte traseira. Foi descoberto uma diminuição nos valores de HIC com a diminuição da rigidez do casco e da densidade do forro protector. Foram também testados capacetes sem casco, que levavam a valores de HIC ainda mais baixos. Estes testes também resultaram numa menor velocidade de ressalto. Assim, os autores concluíram que o casco é o principal responsável por maiores velocidades de ressalto e consequentemente maiores valores de HIC, visto ser uma função tanto da magnitude como da duração da resultante das acelerações

²Lesões que não apresentam ferimentos.

(ver secção 1.3).

Os autores, no mesmo estudo [16] também constataram que, se a capacidade de esmagamento do capacete for toda utilizada, um valor significativamente baixo de HIC pode ser obtido. Os capacetes actuais apenas usam uma pequena parte da sua capacidade. Uma conclusão que também foi estabelecida pelo estudo de Beusenbergh e Happee [14].

A conclusão geral acerca dos estudos em capacetes é, tanto o forro protector como o casco dos actuais capacetes de motos são demasiado rígidos. Ao reduzir a rigidez do casco reduzimos a duração do pico da aceleração, e reduzir a densidade do forro protector reduz a magnitude desse mesmo pico. No entanto há limitações para esta conclusão. Não ter casco (rigidez nula) leva a baixos ressaltos, contudo leva também a uma fraca capacidade de distribuição de forças. Especificamente no trânsito, esta capacidade de distribuição de forças pode ser indispensável, uma vez que são comuns cargas localizadas ($> 10\%$ [13, 18]). Estas cargas levam a um aumento da possibilidade de ocorrer fracturas no crânio. Por outro lado, quando o forro protector tem uma densidade demasiado baixa, ocorre o *bottoming-out*, resultando numa rápida transferência de forças para a cabeça. Por outro lado, uma redução da rigidez do casco e do *padding* de protecção significa um maior risco de ocorrência de *bottoming-out*, o que leva a que, num segundo impacto no mesmo ponto, o risco de ocorrerem lesões graves e fatais aumentava. Assim, o ideal seria a utilização de materiais menos rígidos mas que possuíssem retorno elástico quase total, garantindo deste modo que a capacidade de absorção de energia do capacete não era fortemente afectada pelos impactos.

Modelação numérica de testes de queda normalizados

Outro meio de obter conhecimento sobre a forma como os capacetes protegem a cabeça é realizando simulações numéricas. O recurso a este tipo de análise é cada vez mais elevado, visto ser um meio cada vez mais eficaz e menos dispendioso de obter dados sobre o desempenho das estruturas estudadas. São encontrados dois tipos de modelos numéricos, para descrever o comportamento de cabeças com capacetes em impacto, na literatura: (i) Modelos de massas concentradas e (ii) modelos de elementos finitos (modelos EF).

Modelos de massas concentradas

Neste tipo de simulações, o capacete (componentes do capacete) e a cabeça são modelados como massas rígidas ligadas por molas e/ou amortecedores. São modelos computacionalmente leves e podem facilmente ser usadas para orientação geral de estudos. Não se encontram muitos modelos de massas concentradas na literatura. Mills e Gilchrist [19] usaram um modelo deste género para simular a deformação de um capacete resultante de impactos em plataformas planas e hemisféricas. Assim, concluíram que um desenho cuidadoso das espumas presentes no capacete, pode ser de grande importância para melhorar as capacidades de absorção de choque nos capacetes.

Mais tarde, os mesmos autores [3] melhoraram este modelo incluindo o casco (figura 1.5). Foram investigadas as forças do impactor/plataforma de impacto em impactos secundários e a influência da velocidade nas forças do impactor/plataforma de impacto. Tal como nos estudos experimentais anteriormente discutidos, concluíram que a força na plataforma poderia ser reduzida usando um casco mais flexível combinado com um *padding* de protecção de baixa densidade (menos rígido). Algumas normas de capacetes requerem testes de impacto pressupondo impactos duplos e testes de penetração (ver secção 1.2), o que leva à utilização de cascos e *padding*s de protecção rígidos. De acordo com os autores, se estes requisitos fossem abandonados, o projecto do capacete poderia ser melhorado. De facto, o teste de penetração foi abandonado pela norma ECE em 1995 [2].

Kötner e Stöcker [20] desenvolveram um modelo aglomerado usando o método de transferência

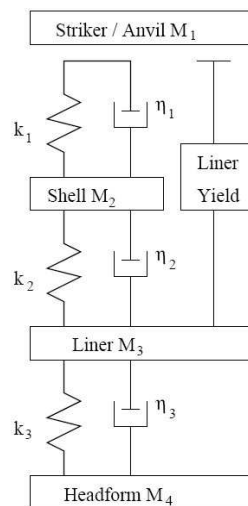


Figura 1.5: Modelo de massas aglomeradas de um capacete [3].

matricial. Eles descobriram que o aumento da densidade do *padding* de protecção e da espessura do casco levava a um aumento da aceleração do modelo da cabeça, e que um aumento da espessura do *padding* apenas tinha um pequeno efeito de redução da aceleração da cabeça.

A principal desvantagem dos modelos de massas concentradas é que geralmente envolvem hipóteses que não traduzem fielmente o modelo geométrico que se pretende estudar, e por isso não são adequados para estudos quantitativos. Além disso, eles apenas são capazes de descrever a deformação causada por uma força de direcção específica, requerendo a (re)calibração dos parâmetros do modelo para cada configuração de impacto.

Modelos de elementos finitos

Os modelos de Elementos Finitos (EF) são modelos de construção mais demorada e mais pesados computacionalmente quando comparados com os modelos de massas concentradas. No entanto, uma vez construído o modelo 3D em EF ele pode ser usado em qualquer configuração de impacto, sem mudar os seus parâmetros e mesmo assim produzir resultados quantitativos. Também os parâmetros da geometria e do material são geralmente mais precisos e mais fáceis de avaliar. Durante o impacto, as mudanças na forma do capacete, em particular do *padding* de protecção, influenciam o comportamento mecânico do capacete. Este efeito não pode ser modelado com modelos de massas concentradas. Para além disso, as acelerações rotacionais também não podem ser modeladas, que podem ser de grande influência para as lesões na cabeça [1, 21, 22].

Vários modelos de EF de capacetes de motos são encontrados na literatura (e.g. Köstner e Stöcker [20], Yettram *et al.* [23], Brands *et al.* [24], Chang *et al.* [25]). Todos os estudos modelaram o casco e o *padding* de protecção, mas nenhum deles teve em conta o efeito do *padding* de conforto, que confere um melhor ajustamento da cabeça ao capacete, e apenas os modelos de Brands *et al.* e de Chang *et al.* foram validados por resultados experimentais.

Köstner e Stöcker [20] testaram a variação da espessura do casco e do *padding* protector, a densidade do *padding* e a energia de impacto em simulações de impacto de topo. Destas simulações resultou o seguinte:

- a aceleração máxima da cabeça aumenta com o aumento da espessura do casco;
- a aceleração máxima da cabeça aumenta com o aumento da densidade do forro protector;

- a aceleração máxima da cabeça diminui ligeiramente com o aumento da espessura do forro protector;
- a aceleração máxima da cabeça aumenta com o aumento da energia de impacto.

Para reduzir o efeito da energia de impacto na aceleração da cabeça, eles descobriram que os *padding*s deveriam ser num material com comportamento perfeitamente plástico, que combinado com um casco rígido, deveria garantir uma aceleração constante para um vasto leque de níveis de energia de impacto.

Yettram *et al.* [23] apenas variou a rigidez do casco (espessura de 4 mm) e a densidade do forro protector (espessura de 25 mm) nas suas simulações. Foram medidas as curvas tensão-deformação da espuma de EPS para caracterizar as propriedades do material do *padding* de protecção. Realizaram também, cálculos analíticos usando a "teoria dos materiais", para um material hipotético com muito baixa rigidez. Dos seus cálculos obtiveram o pico da aceleração e os valores de HIC. Embora os autores não representem um capacete existente, pois tem uma geometria simplificada - e desta maneira os valores numéricos do pico da aceleração e do HIC não devem ser considerados em relação a nenhuns valores especificados relativamente à lesão - a tendência que emerge corresponde à encontrada em investigações experimentais (Beusenberg e Happee [14], Hopes e Chinn [16]), que confirma que, para uma melhor protecção da cabeça (*i.e.* baixos valores de aceleração e HIC), o casco deve ser menos rígido e o *padding* de protecção menos denso do que os que existem actualmente.

Brands *et al.* [24] conduziram um estudo paramétrico bem como um modelo de validação usando dados de um teste de queda. Os parâmetros do material do *padding* protector foram usados para ajustar o modelo afim de coincidir com os dados do teste de queda. Os resultados deste estudo paramétrico (impacto de topo) mostram que a força de impacto é aplicada à cabeça através de dois mecanismos: (i) esmagando o *padding* de protecção e (ii) vibrações do casco (figura 1.6).

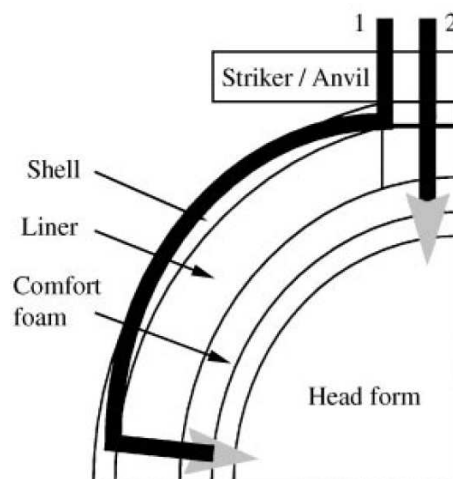


Figura 1.6: Modos de transferência de forças para a cabeça durante um impacto [3].

Estas descobertas foram confirmadas por estudos discutidos anteriormente de Gilchrist e Mills [3] e Beusenberg e Happee [14]. Os autores [24] também descobriram que o comportamento do material constituinte do *padding* de protecção tem uma grande influencia na energia absorvida pelo capacete.

Brands *et al.* [24] ainda validaram o seu modelo para impacto lateral e frontal, com resultados razoáveis. No entanto, as propriedades do material do *padding* do capacete real em que o modelo

foi baseado, não são constantes em todo o capacete. Os autores pensam que modelando o capacete e o *padding* de conforto correctamente poderiam melhorar os resultados obtidos.

Chang *et al.* [26] estabeleceram um modelo em elementos finitos baseado em características geométricas reais, avaliando o seu desempenho como estrutura protectora. Concluiu-se que a resposta dinâmica do capacete varia drasticamente com a velocidade de impacto, bem como com as propriedades do *padding* de protecção e do casco. A baixas velocidades (inferiores a 8.3 m/s) a rigidez do casco e a densidade do *padding* deveriam ser relativamente baixas para diminuir a força contacto na cabeça. Para altas velocidades (superiores a 11.1 m/s) uma rigidez mais alta do casco e um *padding* mais denso conferem uma protecção superior.

O capacete de moto é a melhor protecção da cabeça para a prevenção de lesões causadas por impactos directos no crânio. Um modelo de elementos finitos baseado nas características geométricas reais de um capacete de moto é estabelecido, e o análise explícita utilizando o LS-DYNA™ é utilizada para simular a resposta dinâmica para diferentes velocidades de impacto. O pico de aceleração e os valores de HIC da cabeça são usados para avaliar o desempenho protector do capacete. Concluiu-se que a resposta dinâmica do capacete varia drasticamente com a velocidade de impacto, bem como as propriedades mecânicas do casco e do forro protector.

A maior parte dos estudos numéricos, tanto de massas concentradas como de elementos finitos, e dos estudos experimentais descobriram que a densidade do *padding* protector e a rigidez do casco devem ser reduzidas para reduzir a magnitude e duração da resultante das acelerações da cabeça. Obviamente, existe um limite para a redução da rigidez do capacete, no que diz respeito às suas capacidades de protecção mantendo inalterada as propriedades geométricas, não existindo no entanto estudos sobre isso. Para além disso, como já foi referido, uma diminuição da rigidez do casco e do *padding* de protecção (ou utilizando um material puramente plástico neste componente) leva a um maior risco de *bottoming-out* aquando um impacto. Isto leva a que, o capacete não tenha a capacidade de absorver um segundo impacto no mesmo ponto.

Estudos experimentais baseados em testes de queda modificados

Estes estudos investigam o efeito das mudanças de procedimento dos testes na avaliação do desempenho do capacete. Muitos investigadores têm-se questionado se os modelos da cabeça utilizados nos testes de queda normalizados representam correctamente a cabeça/corpo humano. Mesmo que actualmente o único modelo da cabeça utilizado nas normas de certificação de capacetes rodoviários seja um modelo de cabeça rígida, existem modelos mais avançados. Na figura 1.7 estão representados alguns modelos existentes.

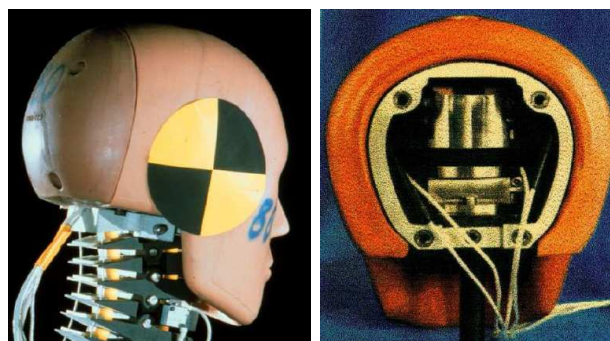


Figura 1.7: (a) - Modelo da cabeça *Hybrid III*; (b) - Modelo da cabeça *Bi-mass 150*

O modelo da cabeça *Hybrid III*, compõe o modelo de dano *Hybrid III* para aplicações em

crash tests de carros, e é composto por um modelo rígido da cabeça envolvido em borracha de vinil, desenvolvido de maneira a que consiga representar as acelerações presentes na cabeça de ocupantes de veículos automóveis aquando um impacto. O modelo *Bi-mass 150*, foi desenvolvido por Willinger *et al.* [27] a partir do modelo *Hybrid III*, ao qual inseriu uma massa representativa do cérebro, ligada elasticamente ao crânio, de tal forma que a frequência natural do modelo corresponde aos 150 Hz medidos *in-vivo*.

Vincze-Pap e Áfra [28] realizaram, em laboratório, ensaios de queda comparativos em capacetes, usando vários modelos para modelar a cabeça/corpo humano. Assim, estes autores usaram um modelo do tipo *Hybrid III* de corpo inteiro, um modelo *Hybrid III* cabeça + pescoço e um modelo normalizado em ligas de Mg. Eles apenas consideraram as acelerações translacionais do centro de gravidade da cabeça. A resultante das acelerações mais baixas foram medidas nos testes com o corpo inteiro. O teste com o modelo da cabeça normalizado obteve a maior resultante das acelerações. Os autores concluíram daqui que, durante um acidente real, a força de impacto que actua sobre a cabeça é transmitida pelo pescoço ao corpo, resultando numa menor resultante das acelerações no centro de gravidade da cabeça. Além disso, o ressalto da cabeça foi significativamente menor e o movimento de rotação da cabeça foi bastante maior no teste com o corpo inteiro do que nos outros dois testes. Isto indica uma transformação da energia cinética de translação em energia cinética de rotação em vez de uma absorção da mesma. O movimento de rotação da cabeça foi observado a partir de imagens captadas durante o ensaio, embora não tenha sido quantificado.

Willinger *et al.* [27] usaram testes de queda em capacetes com cabeça, usando o modelo da cabeça *Bi-mass 150*, e utilizaram os dados de um acidente real de moto (Chinn *et al.* [29]) como entrada para cálculos em EF utilizando o mesmo modelo para a cabeça. Encontraram uma correlação entre os valores máximos computacionais da aceleração relativa do cérebro-crânio e os valores de AIS de uma vítima de um acidente real. Convém salientar que a representação gráfica desta correlação mostra um conjunto de pontos com um ponto afastado deste grupo, que poderia aumentar injustificadamente o já pobre factor de correlação ($R^2 = 0.54$). Os autores encontraram também uma correlação entre a aceleração rotacional do cérebro e a lesão, e entre o movimento relativo crânio-encefálico e hematoma subdural³ (SDH), mas esta correlação não foi quantificada.

Halldin *et al.* [30] também reconheceu que as acelerações rotacionais são a principal causa de lesões na cabeça em acidentes de moto, em particular o SDH e lesão axonal difusa⁴ (DAI). Uma vez que os impactos oblíquos, com uma força tangencial significativa sobre o capacete, são mais comuns do que impactos radiais (normais) (Otte *et al.* [31]), foi desenvolvido um método de teste oblíquo para avaliar a capacidade do capacete em reduzir as acelerações rotacionais durante um impacto. Neste teste, os capacetes caem livremente sobre uma plataforma em aço, coberta com um papel rectificador⁵, que se move horizontalmente (figura 1.8).

Testou-se um tipo de capacete com três interfaces diferentes entre o casco e o *padding*:

- No capacete **LIGADO**, o casco foi colado ao *padding*;
- No capacete **LIVRE**, o casco e o *padding* só foram ligados por uma junta flexível no bordo inferior. Não foram introduzidas contramedidas para reduzir o atrito entre o casco e o *padding*;
- No capacete com sistema de protecção de impacto multi-direccional (**MIPS**), que foi projectado para reduzir a aceleração rotacional da cabeça, foi colocado um filme de Teflon

³Hematoma formado no revestimento externo do cérebro, como consequência do sangramento das veias que se encontram à volta do mesmo.

⁴Caracteriza-se por estiramento dos neurónios em decorrência dos movimentos súbitos de aceleração e desaceleração.

⁵Do inglês: *grinding paper*.

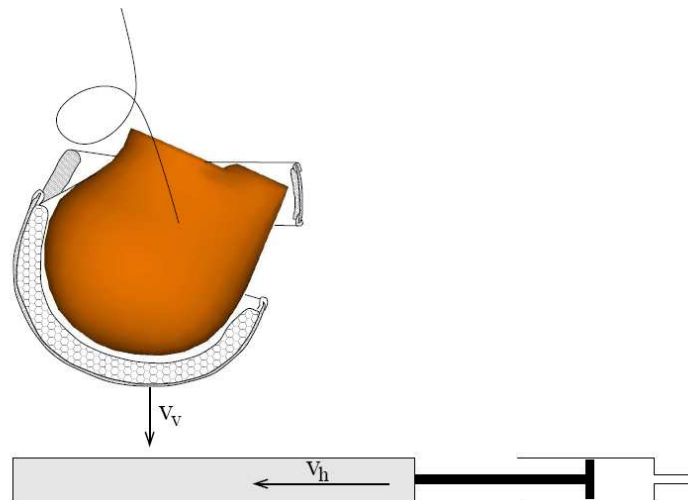


Figura 1.8: Teste de impacto oblíquo realizado por Halldin *et al.* [30], onde V_h representa a velocidade horizontal do prato e V_v a velocidade perpendicular de impacto.

de baixo-atrito entre o casco e o *padding*.

O capacete **MIPS** reduz significativamente o pico de aceleração rotacional (mais de 50%) em todos os testes oblíquos, comparado com os capacetes **LIVRE** e **LIGADO**. Além disso, a presença de uma placa com velocidade horizontal, para testes com a mesma velocidade de impacto perpendicular, o pico da aceleração translacional foi reduzido para os capacetes **LIVRE** e **MIPS**. Note-se que o *padding* de conforto foi retirado do capacete. Isto pode ter influenciado significativamente os resultados, uma vez que uma das funções deste componente é conferir um melhor ajuste, o qual acredita-se ser especialmente importante em impactos oblíquos.

Problema e objectivos

Do que foi apresentado, pode concluir-se que muitos investigadores estudaram o desempenho dos capacetes rodoviários e tentaram encontrar meios para melhorar esse desempenho baseando-se em vários critérios. Isto sugere que os capacetes, em particular o *padding* de protecção deve ser menos rígido para reduzir o risco de lesões (graves) na cabeça. Estas conclusões são tiradas a partir de estudos experimentais e numéricos de testes de queda onde apenas (funções derivadas a partir) a aceleração translacional é considerada.

Ao longo dos anos, as normas para capacetes têm evoluído de maneira a serem um meio cada vez mais eficaz de garantir a qualidade do capacete. Em geral, as normas para capacetes são o resultado de muitos compromissos, bastante pragmáticos, em reuniões de peritos e técnicos, mais do que da investigação científica. Assim, tal como a qualidade do capacete aumentou, os critérios do teste de absorção de choque foram elevados, e as condições de impacto mais rigorosas. Esta estratégia resultou em capacetes que reduzem as possibilidades de um acidente fatal em mais de 57% (Hurt Jr. *et al.* [13]).

O teste de absorção de choque da norma ECE (ECE-R.22) vai ser o principal objecto de estudo desta tese. Neste teste, a força sobre a cabeça com capacete é gerada pela queda da mesma, instrumentada com acelerómetros tri-axiais, sobre uma plataforma de impacto a uma velocidade de $v = 7.5$ m/s. A qualidade do capacete é determinada medindo o gráfico de aceleração da cabeça durante o impacto e é expressa em termos de parâmetros de lesão: resultante máxima da aceleração translacional da cabeça (a_{max}) e critério de lesões da cabeça (HIC). O HIC é actualmente o principal parâmetro para medir lesões na cabeça utilizado em investigação automóvel. O modelo

da cabeça usado neste teste, é um modelo rígido em Alumínio. Comparado à primeira edição a BS 1869:1952, a aplicação da força na cabeça e a avaliação das lesões são muito melhoradas na ECE-R.22. O modelo da cabeça tem permanecido quase inalterado.

1.2 Normas de testes em capacetes rodoviários

1.2.1 Introdução

Esta secção apresenta uma breve resenha histórica das normas reguladoras dos testes realizados em capacetes e apresenta as diferenças e semelhanças entre as versões correntes das normas DOT, Snell e ECE. Importa, desde já ressaltar, que estas normas apenas são aplicadas a transportes, não abrangendo o desporto, actividades de lazer e defesa. Assim sendo, as normas DOT e Snell são largamente aplicadas em capacetes destinados aos Estados Unidos e ao Canadá. Por sua vez, a norma ECE é a norma vigente na Europa, sendo por isso abordada mais detalhadamente, uma vez que é a base desta dissertação.

1.2.2 História

Os capacetes rodoviários tem vindo a melhorar substancialmente, tanto em conforto como em comodidade, desde a primeira patente registada em 1953 [32] e o primeiro capacete integral, construído em 1967. Em todo o mundo, existem normas rígidas para testar capacetes, que são, na sua maioria, (re)elaboradas aproximadamente a cada 5 anos, quando o nível de desenvolvimento permite uma melhoria no que diz respeito à protecção da cabeça (e.g. o nível de conhecimento sobre as lesões da cabeça, materiais com melhor absorção de energia, etc.). Com isto, ao longo dos tempos, à medida que os capacetes são construídos, o nível de desempenho dos mesmos tem aumentado gradualmente, acompanhando o grau de exigência das normas vigentes.

A primeira norma de testes em capacetes rodoviários, foi a britânica 1869:1952 [33], constituída pela *British Standard Institution (BSI)*. Este teste aplicava forças de choque a um modelo de cabeça usando um capacete. Quanto aos ensaios técnicos, estes consistiam na queda, de uma altura de 2.7 m, de um bloco com 4.5 kg sobre o modelo. Os resultados baseavam-se na medida das forças dinâmicas gravadas a partir de um indicador montado entre a base da cabeça e o bloco sólido onde a cabeça estava fixa (*massive reaction block*). O critério do teste requeria que a força medida não fosse superior a 22.2 kN. Assim sendo, apenas os capacetes que passavam neste teste eram qualificados e vendidos na Grã-Bretanha.

Esta norma serviu dois objectivos imediatos: por um lado, foi uma ferramenta de avaliação dos capacetes existentes, por outro, serviu de guia para a concepção de novos capacetes. É importante definir, previamente, os níveis que cada teste de impacto deve satisfazer. No início dos anos 60, a *Snell Memorial Foundation (SMF)* começou por administrar um programa de certificação de capacetes similar ao programa da *BSI*. Contudo os níveis de desempenho foram definidos a níveis mais elevados, possibilitando apenas certificar os melhores capacetes. Estes níveis, à medida que os capacetes os conseguiam cumprir, iam consequentemente aumentando. Em contraste com a norma Britânica, passar na norma da Snell não era obrigatório. No entanto, os fabricantes estavam ansiosos por passar nesta norma, pois os capacetes certificados pela mesma eram vendidos mais facilmente do que os não certificados.

Em 1966, a *American Standards Association (ASA)*, mais tarde *American National Standards Institute (ANSI)* publicou a primeira norma para capacetes de protecção, Z90.1-1966 [34], pela qual todos os capacetes vendidos nos Estados Unidos tinham que se reger. Desta, surge a actual norma Federal de Segurança Automóvel 218 (FMVSS 218), que se tornou efectiva em 1973 e é emitida pelo *U.S. Department of Transport (DOT)*. A FMVSS 218 é também obrigatória. Contudo, ambas as normas não administram nenhum programa de certificação correspondente. Os fabricantes

afirmam que para dar cumprimento à DOT são obrigados a fabricar os seus produtos com o emblema da DOT, mas não lhes é exigido que se informe o governo ou até mesmo que se teste o capacete. A única razão para o cumprimento da DOT, servirá para evitar eventuais conflitos legais que surjam, uma vez que, em caso de acidente, são os fabricantes os responsáveis pelas lesões sofridas.

Em 1970 a primeira norma Europeia, ISO R 1511 [35] tornou-se efectiva. Actualmente, o Regulamento ECE 22 [2] é a principal norma na Europa. Ambas as normas resultam do esforço das Nações Unidas em promover o comércio internacional e foram recomendadas como modelos aos diversos governos para o desenvolvimento de normas nacionais. A sua administração é levada a cabo por "organismos notificados", isto é, por agências distribuídas por toda a Europa, com poderes para examinar os pedidos de aceitação e atribuição da marca "CE", marca que identifica cada produto que passa pela norma. O Regulamento ECE 22, tal como as normas, Snell e DOT, são fortemente influenciadas pela norma BSI [17].

1.2.3 Sumário das normas de testes de capacetes

Cada norma especifica vários testes, nomeadamente para diferentes aspectos do desempenho do capacete, tais como:

- **Testes de absorção de choque**, envolvem um teste de impacto onde um modelo da cabeça é colocado dentro de um capacete e em seguida deixado cair sobre uma plataforma. A aceleração medida no centro de massa do modelo da cabeça é relacionada com a capacidade do capacete em reduzir o risco de lesão na cabeça/cérebro, que advêm das forças de impacto;
- **Testes de avaliação à resistência de penetração**, avaliam a capacidade de resistir ao impacto com objectos que podem causar forças localizadas, existindo a possibilidade de penetração do capacete e da cabeça;
- **Testes de rigidez**, envolvem a aplicação de uma força de compressão quase-estática, avaliando assim a capacidade do capacete em suportar forças de compressão;
- **Testes de fricção**, podem ser divididos em duas categorias:
 - Testes em que as forças são criadas por abrasão;
 - Testes em que as forças são criadas por contacto com saliências.

Ambos os testes tendem a transmitir movimento rotacional ao capacete e à cabeça, que deverá ser reduzido.

- **Testes de avaliação de sistemas de retenção**, avaliam os sistemas de retenção do capacete tendo em conta a sua capacidade em resistir a forças externas e a manter o capacete na cabeça durante um acidente. Estes testes podem incluir um teste de *roll-off*, onde o capacete não deverá sair da cabeça e os sistemas de retenção deverão manter-se em funcionamento;
- **Testes de segurança das viseiras**, podem incluir testes à visão periférica mínima e à qualidade óptica. A visão dos utilizadores da estrada não pode ser prejudicada pela utilização do capacete;
- **Testes da capacidade de inflamação** que avaliam a capacidade do capacete em resistir ao fogo. Estes testes são apenas para capacetes usados em competições, ou seja, os capacetes comuns usados no trânsito não estão sujeitos a estes tipo de testes.

A tabela 1.4, dada na secção seguinte, dá uma visão geral dos requisitos de cada teste, para as normas ECE, Snell e DOT. As normas ECE e DOT são normas legalmente aprovadas na Europa e nos Estados Unidos, respectivamente. A norma Snell é também discutida, uma vez que é uma norma credível e é mais rigorosa, relativamente à norma DOT. Quanto à norma ECE, como confirma a tabela, é a mais rigorosa. Contudo, na maioria dos testes, os requisitos da Snell M2000 são mais rigorosos e mais extensos.

Testes de absorção de choque

A protecção contra o impacto é a primeira preocupação da maioria das normas. Embora os testes de absorção de choque serem os mais usados para a avaliação do capacete contra impacto, a qualidade do capacete não é avaliada medindo a quantidade de energia absorvida. Em vez disso, a aceleração da cabeça é medida durante o tempo de impacto e, a partir desses resultados, os parâmetros de lesão, como a máxima aceleração da cabeça e o HIC, ou possivelmente outros critérios que possam estar relacionados com potenciais lesões, são determinados. O rigor do teste, em termos de energia cinética da cabeça e do capacete, antes do impacto, e a forma da plataforma de impacto onde este ocorre, varia de norma para norma. A tabela 1.5 compara as condições dos requisitos das normas Snell, DOT e ECE.

Tabela 1.4: Resumo das normas de capacetes [9].

Norma	Choque	Penetração	Retenção	Visor	Rigidez	Fricção
ECE-R.22	X	X	X	X	X	X
Snell M2000	X	X	X	X		
DOT FMVSS 218	X	X	X	X		

Tabela 1.5: Resumo das normas de capacetes [9].

Norma	Forma da Plataforma	Impacto		Critério
		1º impacto	2º impacto	
ECE-R.22	plana ou cutelo*	7.5 [m/s]	-	$a_{r,max} < 275$ [g] HIC < 2400
Snell M2000	plana	150 [J]	110 [J]	$a_{max} < 300$ [g]
	hemisférica	150 [J]	110 [J]	
	berma	150 [J]	-	
DOT FMVSS 218	plana	6.0 [m/s]	6.0 [m/s]	$a_{max} < 400$ [g] $a_{[2ms]} < 200$ [g] $a_{[4ms]}max < 150$ [g]
	hemisférica	5.2 [m/s]	5.2 [m/s]	

* - depende das condições (ver parágrafo 1.2.3):

Ambiente: plataforma plana e em cutelo;

Calor: plataforma em cutelo;

Frio: plataforma plana;

Molhado: plataforma plana e em cutelo (a ser seleccionada pelo laboratório).

A tabela apresentada revela os diferentes impactos previstos sobre diferentes plataformas. Existem 4 plataformas diferentes: a plana, usadas em todas as normas; a hemisférica, com um diâmetro de cerca de 0.1 m, usada na M2000 e na DOT; em cutelo⁶, que se assemelha ao pavimento, usada na R.22; e a plataforma com berma, que é composta por um feixe de 6 mm de

⁶Do inglês: Kerbstone anvil.

largura, usada na M2000.

Impacto

A norma M2000 exige pelo menos cinco impactos num capacete de forma aleatória: dois impactos numa plataforma plana, num único ponto; dois impactos numa plataforma hemisférica, num ponto a pelo menos 120 mm do ponto de impacto anterior; e um impacto numa plataforma com berma a pelos menos 120 mm dos pontos dos dois impactos anteriores. A primeira queda é sempre com energia de 150 J, o que equivale a uma velocidade de impacto de 7.7 m/s, e a segunda queda, se for requerida, é sempre de 110 J, que equivale a uma velocidade de impacto de 6.6 m/s. A gravidade é descrita em termos da energia cinética da cabeça e do sistema de guiamento, sem o capacete. A massa da cabeça e do sistema de guiamento não varia com o tamanho da cabeça. Os procedimentos de impacto deixa uma margem considerável a quem está a testar o capacete, quanto ao ponto de impacto e à selecção da plataforma. É esperado que o técnico use a sua experiência para organizar cada série de testes de modo que as potenciais fraquezas e os prováveis modos de falha sejam exercidos.

A norma DOT também requer dois impactos em cada ponto, testados contra plataformas planas e hemisféricas, não requerendo impactos contra outras plataformas. Cada capacete recebe oito impactos, isto é, nas duas plataformas são seleccionados dois pontos diferentes, recebendo cada ponto dois impactos. Os pontos de impacto têm que ser separados, pelo menos 1/6 da circunferência da cabeça e a gravidade é descrita em termos da velocidade da cabeça, apenas antes do impacto. A velocidade requerida depende da plataforma, apesar de ser sempre igual no primeiro e segundo impacto. A energia cinética do sistema antes do impacto não é igual para todas as cabeças, uma vez que uma cabeça grande, incluindo o sistema de guiamento, é, em contraste com a M2000, mais pesada do que uma cabeça mais pequena com o mesmo sistema de guiamento. Assim, o tamanho do capacete determina a cabeça a usar, e consequentemente a energia cinética, da cabeça e sistema de guiamento, antes do impacto. A energia cinética antes do impacto para as cabeças pequenas, médias e grandes, incluindo sistema de guiamento, é respectivamente 63, 90 e 110 J para impactos em plataformas planas, e 47, 68 e 82 J para plataformas hemisféricas.

A norma ECE requer apenas um impacto contra plataformas planas e em cutelo. Tal como a DOT, a gravidade do impacto é descrita em termos da velocidade de impacto: 7.5 m/s para ambas as plataformas. A norma ECE usa 8 tamanhos de cabeças normalizadas, indicados pelas letras A, C, E, G, J, K, M e O. A energia de impacto para os tamanhos E, J e M, que são comparáveis aos tamanhos pequeno, médio e grande dos modelos da cabeça usados na DOT, é respectivamente 115, 132 e 158 J. Um impacto único aproxima-se aos níveis do primeiro impacto da Snell M2000, e excede-os para os modelos da cabeça de tamanhos maiores. Os pontos de impacto para a norma ECE são predefinidos na frente (ponto B), lado (ponto X), topo (ponto P) e atrás (ponto R) do capacete (figura 1.9).

A principal diferença entre a norma ECE e as normas DOT e Snell é no modo como a cabeça é suportada durante o teste de queda. Nos testes da DOT e Snell o movimento rotacional é eliminado durante o teste, e a cabeça apenas se pode mover na direcção do impacto. Por outro lado, no teste da ECE o movimento da cabeça e do capacete não é eliminado em nenhum sentido, permitindo o movimento em todos os 6 graus de liberdade durante o impacto. Neste ultimo caso, o sistema de guiamento não é fixo à cabeça e capacete e portanto não contribui para a força sobre o capacete.

Condições

Todas as três normas aplicam tipos de condições similares ao capacete antes da execução dos testes. O condicionamento é sempre precedido de um tratamento com uma mistura solvente,

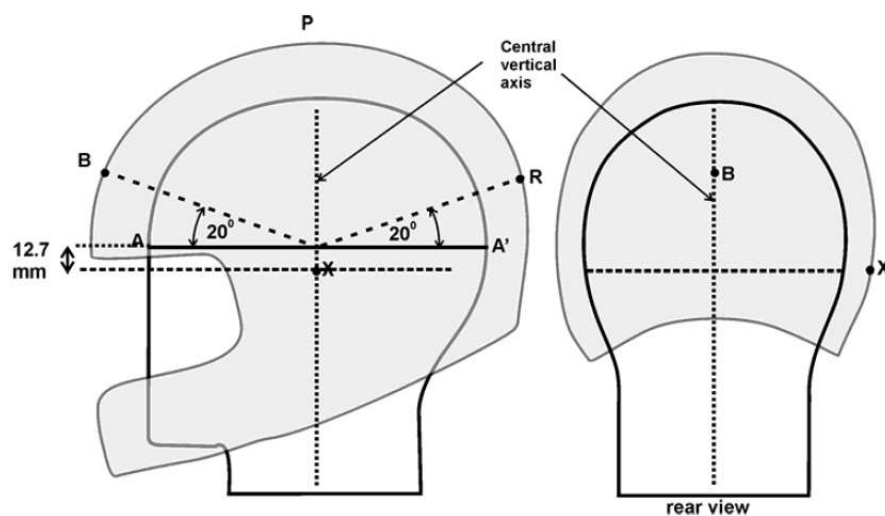


Figura 1.9: Identificação dos pontos de impacto de acordo com a norma ECE-R.22/05 [2].

para simular o desgaste da utilização do capacete. Depois existem 4 tipos de condições para simular diferentes condições atmosféricas: ambiente, calor, frio e molhado. A norma ECE requer uma série completa de testes com as quatro condições a serem testadas em diferentes capacetes, enquanto a DOT e SNELL deixam à escolha do técnico o tipo de condição a usar. O técnico escolhe as condições, que considera prejudicar mais o desempenho do capacete. Se este decidir testar também outras condições, pode-o fazer antes do fim do protocolo de teste. Esses testes devem ser realizados no mesmo capacete, seguindo depois o restante protocolo.

Barra do queixo

A maioria dos capacetes vendidos na Europa, são capacetes integrais. Estes são equipados com uma barra de queixo, também chamada guarda-queixo, que protege a cabeça contra o impacto na zona do queixo. As normas Snell e ECE especificam testes para esta zona, caso os capacetes sejam equipados com esta protecção. A norma ECE usa testes de queda normalizados para esta zona, com a velocidade de 5.5 m/s sobre uma plataforma plana, requerendo que a aceleração máxima resultante não exceda 275 g e que o HIC seja inferior a 2400. Se um destes limites for excedido no teste da barra de queixo, o capacete não é rejeitado, contudo é necessário informar o utilizador que aquele capacete não protege o queixo dos possíveis impactos. A norma Snell aplica um modo diferente. De acordo com esta norma, quando uma massa de 5 kg é deixada cair verticalmente sobre o guarda-queixo, a uma velocidade de 3.5 m/s, este não deve apresentar uma deflexão superior a 60 mm. Se essa deflexão for excedida, o capacete é rejeitado.

Discussão

As normas acima abordadas, apenas medem e calculam acelerações translacionais. Os efeitos rotacionais deveriam ser tomados em consideração nas novas normas de capacetes, dado que se acredita que as acelerações rotacionais são as mais importantes causas de lesões graves na cabeça: SDH e lesões de corte. Contudo, os movimentos rotacionais são eliminados pelos sistemas de guiamento das normas DOT e Snell. Neste caso, a energia cinética rotacional, que teria sido libertada quando a cabeça não é suportada é, absorvida pelo capacete e pelo sistema de restrição de movimento. A norma ECE não restringe qualquer movimento durante o impacto, permitindo

deste modo movimentos rotacionais, contudo estes movimentos não são medidos. Num acidente real, o movimento da cabeça nem é completamente eliminado nem completamente livre, mas é limitado pelo pescoço que liga a cabeça ao tronco. Por outras palavras, o tronco não pode ser considerado totalmente sem massa (ECE), nem uma massa infinita (DOT e Snell), no que diz respeito ao movimento rotacional.

Os capacetes integrais oferecem melhor protecção para a área da face e do queixo, relativamente aos capacetes que não são equipados com o guarda-queixo. Assim, qualquer capacete equipado com guarda-queixo, que passe ou não nos testes de queda, é provavelmente melhor do que um que não possua este tipo de protecção. Portanto, a norma ECE não rejeita os capacetes que não cumpram os requisitos dos testes, pois isso poderia encorajar o fabricante a remover o guarda-queixo num novo design do capacete. Assim, um capacete que não passe no teste não é rejeitado, no entanto irá oferecer menor protecção ao utilizador.

Testes de resistência à penetração

A penetração é uma causa pouco frequente de lesão, por isso, a ECE deixou de requerer o teste de penetração quando as alterações à série 04 entraram em vigor. Os testes de penetração descritos nas normas DOT e Snell são idênticos. Assim, a cabeça é fixa ao chão e um punção de metal, com ponta cónica e massa de 3 kg é deixado cair, de uma altura de 3 m, sobre a cabeça com capacete (energia de impacto de 88.3 J). Se o punção tocar na cabeça durante o impacto, o capacete falha o teste. Embora as lesões como resultado da penetração sejam raras, o teste de resistência à penetração deveria continuar a ser incluído na norma. Caso contrário, os fabricantes de capacetes irão reduzir a prioridade no que respeita a esta qualidade em particular e a frequência das lesões resultantes da penetração poderão aumentar, assim como a sua gravidade.

Testes ao sistema de retenção

Todas as três normas requerem um teste à capacidade dos sistemas de retenção em suportar cargas externas. A norma DOT aplica uma força estática à cabeça de 1.11 kN, enquanto as normas ECE e Snell aplicam cargas dinâmicas usando uma massa, que é largada a uma determinada altura (10 kg a 0.75 m e 6 kg a 0.6 m, respectivamente). O sistema de retenção deverá suportar a força e não aumentar o seu comprimento em mais de 30 mm.

A norma Snell e ECE requer, igualmente, um teste de estabilidade posicional, também chamado de teste *roll-off*. Este tenta retirar o capacete da cabeça, sem abrir o sistema de retenção (figura 1.10) aplicando uma carga dinâmica através da queda de uma massa (ECE: 10 kg a 0.5 m; Snell: 5 kg a 0.6 m). Para passar neste teste, o capacete deverá manter-se na cabeça.

A norma ECE inclui outros testes adicionais, nomeadamente para micro derrapagens, resistência à abrasão, saída involuntária do capacete, facilidade de colocação e durabilidade. No que diz respeito ao sistema de retenção pode concluir-se que a norma ECE é a mais rigorosa das três.

Testes à viseira

Os testes à viseira podem ser divididos em: teste à visão periférica, teste à transmissão de luz e teste à resistência à penetração. No entanto, apenas a norma ECE requer os três testes. O teste para a visão periférica é praticamente o mesmo para as normas abordadas, e requer que o campo de visão deve ser pelo menos 210 °. As normas Snell e ECE também requerem testes para verificar a resistência à penetração do visor. Para a norma ECE, este teste é similar ao teste de resistência à penetração do capacete das outras normas discutido anteriormente. Para a norma Snell, um projectil de 1 g é atirado contra o visor a 500 km/h. O capacete é rejeitado quando o projectil estilhaça a viseira ou penetra para o interior do mesmo. A norma ECE inclui ainda uma

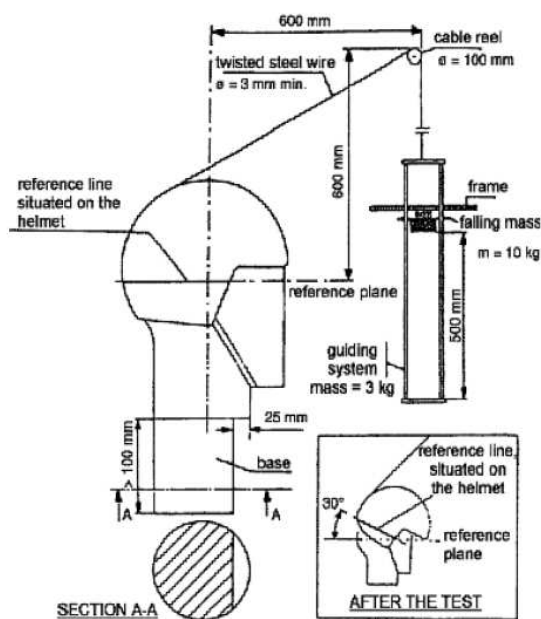


Figura 1.10: Teste de retenção (teste de estabilidade posicional) [2].

exigência relacionada com a transmissão de luz. Se essa transmissão é inferior a 80%, o capacete deverá ser marcado com: "apenas para utilização diurna". Se é inferior a 50%, o capacete deverá ser rejeitado. Depois de um extensivo tratamento abrasivo, como medida para a resistência ao desgaste e ao uso inadequado do capacete, a transmissão de luz ainda deverá manter-se acima dos 20%.

Outros testes

O mais importante teste adicional está incluído na norma ECE. É um teste para projecção e fricção, e é baseado na norma BS 6658. Neste é realizado um teste de queda, onde as forças rotacionais induzidas são causadas por projecções no capacete e por fricção contra a superfície de fora do mesmo, assemelhando-se a um acidente onde o motociclista cai e desliza sobre uma superfície (rugosa). Deste modo, verifica-se se as projecções deslizam facilmente e se o coeficiente de fricção é baixo. Neste teste a cabeça com capacete (tamanho pequeno) é deixada cair sobre duas plataformas diferentes inclinadas a uma velocidade de 8.5 m/s (figura 1.11). Uma das plataforma consiste numa série de pelo menos 5 barras horizontais, 6 mm de altura e 40 mm de espaçamento, enquanto que a outra, plataforma abrasiva, é constituída por uma folha de papel abrasivo. O teste de queda tem o mesmo princípio dos testes de impacto da norma ECE. Durante o teste, as forças na plataforma são medidas. Para as plataformas em barras e abrasiva, estas não devem exceder 2.5 kN e 3.5 kN, nem o integral em relação ao tempo de duração do impacto deve exceder 12.5 Ns e 25 Ns respectivamente. Este integral indica a mudança de impulso. Desde que a massa da cabeça e do capacete (cerca de 6.1 kg) se mantenham inalteráveis durante o impacto, a variação do impulso é na verdade uma variação da velocidade (ΔV). Por outras palavras, ΔV não deve exceder 2.0 m/s para a plataforma de barras e 4.1 m/s para a plataforma abrasiva.

A norma Snell inclui um teste adicional para a amovibilidade. O técnico deverá ser capaz de remover um capacete devidamente ajustado à cabeça em 30 s, usando apenas as mãos, sem acesso a nenhum mecanismo de retenção do mesmo. A amovibilidade do capacete determina assim, se este conseguirá ser removido de uma vítima inconsciente, sem a necessidade de utilização do sistema de retenção, que poderá ter-se danificado após o impacto.

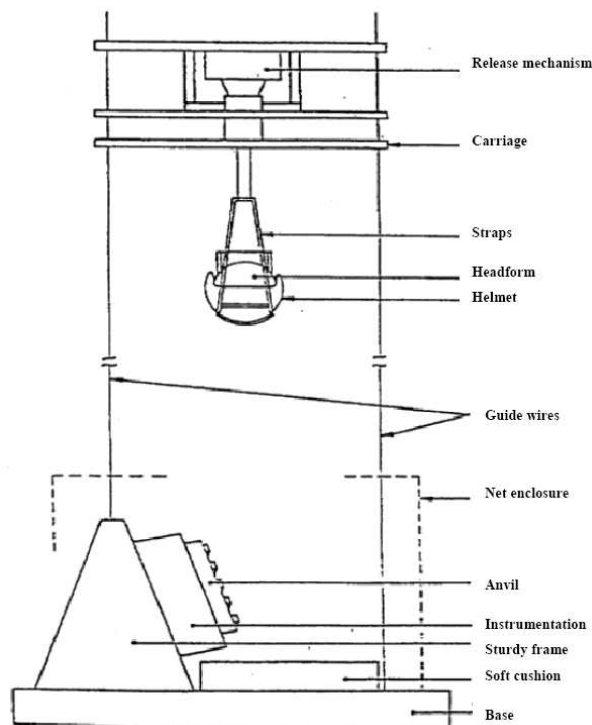


Figura 1.11: Exemplo da estrutura para o teste de projecções e de fricção (método A) [2].

1.2.4 Discussão

Ao longo dos anos, as normas revelaram ser um meio efectivo de assegurar a qualidade do capacete. Em geral, as normas de testes são resultado das experiências realizadas, aquando os mesmos, invés de investigação. Tal como a qualidade do capacete tem vindo a aumentar, assim as normas foram criadas e/ou alargadas com novos testes. Excepto para o teste de absorção de energia, os capacetes raramente falham um teste. Isto não quer dizer contudo, que os restantes testes sejam inúteis, pois se eles fossem retirados das normas, os fabricantes poderiam encontrar a oportunidade de mudar o seu *design*, afim de diminuir os custos, e consequentemente tornar os capacetes menos seguros.

A norma Snell é conhecida como a norma mais rigorosa do mundo, no entanto a norma ECE é bastante semelhante e em determinados casos já se destaca. Isto expressa, não só o rigor dos critérios, como também a diversidade dos testes. Para além disso, apenas a norma ECE requer uma avaliação do HIC, que é aceite pela maioria, como sendo o melhor critério de lesão actualmente disponível (ver secção 1.3). Contudo, o HIC é baseado apenas na aceleração translacional. As normas apenas medem e calculam acelerações translacionais nos testes de impacto e nos testes de projecções e fricção da norma ECE, não existindo nenhuma norma que implemente um teste de avaliação da capacidade do capacete em reduzir lesões resultantes de movimentos rotacionais. Os efeitos rotacionais deveriam também ser tomados em consideração numa nova norma, pois acredita-se que as acelerações rotacionais são as mais importantes causas de lesões graves na cabeça. À medida que o conhecimento acerca das lesões na cabeça tem vindo a aumentar, também as normas têm sido adaptadas e melhoradas. Contudo, este processo é lento, devido à globalização da indústria. Há muitas vantagens em construir um capacete de acordo com uma norma global, em vez da construção de um capacete que tenha de cumprir muitas normas nacionais. Assim sendo, quanto maior é a área onde a norma é aplicada, maior é o número de países filiados a

comprometerem-se, o que dificulta o desenvolvimento das mesmas.

O HIC é um bom exemplo da lentidão do processo de desenvolvimento dos testes normalizados. O HIC foi desenvolvido em 1971 [36], contudo só foi introduzido na norma ECE apenas em 1995. Mesmo quando o limite para a certificação do capacete foi estabelecido no valor actual de 2400, um valor de 1000 é especificado para o HIC como nível de tolerância para concussões em impactos frontais (contacto). Ainda assim, a norma ECE é a única norma que incorpora o HIC. Na secção 1.3 vários critérios de lesão são discutidos. Mesmo que alguns desses critérios pareçam promissores, ainda vai demorar algum tempo até que algum deles seja introduzido em normas de capacetes. Primeiro, porque a validação desses critérios é difícil, e segundo porque as normas internacionais são necessárias para facilitar o aumento do comércio, o que leva a que, a participação de muitos países, como anteriormente foi referido, dificulta a modificação dessas normas.

1.3 Critérios de lesão

Existem diferentes critérios para avaliação do nível de lesão sofrida pela cabeça após impacto. Estes critérios de lesão podem ser divididos em três categorias: (a) Critérios de lesão baseados em acelerações translacionais do centro de gravidade da cabeça; (b) Critérios de lesão baseados em acelerações translacionais e rotacionais do centro de gravidade da cabeça; (c) Critérios baseados em tensões e deformações dentro do cérebro.

1.3.1 Critérios de lesão baseados em acelerações translacionais

Wayne State Tolerance Curve

O *Wayne State Tolerance Curve* (WSTC) é uma curva que fornece a magnitude média da aceleração tolerável na direcção A-P (Anterior - Posterior) em função da duração da aceleração. Através dos trabalhos realizados por Lissner *et al.* [37], Gurdjian [38], Gurdjian *et al.* [39] e Patrick *et al.* [40], esta curva foi sendo aperfeiçoada e é, ainda, a melhor base de investigação para os critérios de lesão da cabeça humana, actualmente aceite. Esta curva, apresentada na figura 1.12, define três áreas distintas desenvolvidas a partir de diferentes testes, onde apenas foi tida em conta as acelerações translacionais. Foi ainda definido como limite de tolerância humana, uma ligeira concussão cerebral sem quaisquer efeitos permanentes. Assim sendo, foram realizados os seguintes testes: Área I, em cadáveres, com fracturas lineares do crânio como critério de lesão (que é assumido ser altamente associado a concussão no cérebro); Área II, com animais, onde a pressão intracranial foi medida e comparada; Área III, em voluntários, onde o critério de lesão foi a perda de consciência. Importa ressaltar que, excepto para longas acelerações (> 20 ms), a curva WST nunca foi validada por seres humanos vivos. Neste sentido, surge a principal desvantagem da curva WST, uma vez que esta é desenvolvida tendo em conta resultados de diferentes tipos de testes, utilizados diferentes tipos de sujeitos, e consequentemente diferentes tipos de lesões são avaliadas.

Severity Index

Gadd [41] argumentou, que nem a aceleração média nem o pico de aceleração observado durante um impacto são suficientes para determinar, com precisão, a resposta da cabeça aquando um impacto. De acordo com Gadd, o potencial da lesão é fortemente dependente do impulso da aceleração e com isto, impulsos com a mesma aceleração média, mas com diferentes formas, podem ter efeitos bastante diferentes.

Para ter estes efeitos em conta, tanto a forma do impulso da aceleração como a sua duração, foi sugerido a integração do sinal da aceleração durante a sua duração. Gadd manteve ainda que

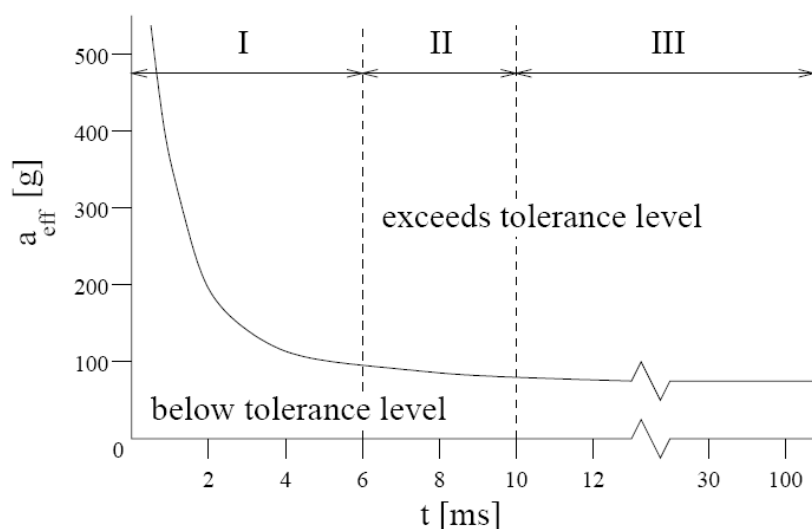


Figura 1.12: Wayne State Tolerance Curve [37].

o potencial da lesão era uma função não-linear da magnitude da aceleração. Assim, sugere-se um factor de ponderação exponencial (maior que 1) a ser aplicado à aceleração, e a sua resultante é então integrada ao longo da duração da aceleração.

Isto levou ao critério de lesão chamado *Severity Index*:

$$(G)SI = \int_0^T a(t)^{2.5} dt \quad (a(t) \text{ em } g\acute{s}). \quad (1.1)$$

O factor de ponderação 2.5 apenas é aplicado à cabeça, e é baseado na aproximação em linha recta da curva WST em escala logarítmica, entre 2.5 e 50 ms.

O mesmo autor propôs um limite (nível de tolerância), para a concussão em impactos frontais, de 1000, o que está de acordo com a curva de WST, com a curva de tolerância de Eiband [42], e com os dados de simulação de acidentes de Swearingen [43]. Mais tarde, o mesmo autor, sugeriu um limite de 1500 para forças que não estejam em contacto directo com a cabeça. O $(G)SI$ sofreu críticas de vários cientistas, nomeadamente de Slattenschek e Tauffkirchen [44], por se desviar consideravelmente da curva WST (baseada em acelerações médias). De acordo com Versace [45], seria possível fazer uma aproximação matemática desta curva em função da aceleração média, sugerindo assim o seguinte critério de lesão:

$$(V)SI = \left[\frac{\int_0^T a(t) dt}{T} \right]^{2.5} T. \quad (1.2)$$

Head Injury Criterion, HIC

Baseado nas críticas de Versace no $(G)SI$, NHTSA [36] sugere que o SI deveria ser substituído por um critério ligeiramente diferente chamado *Head Injury Criterion* (HIC):

$$HIC = \left\{ \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt}{t_2 - t_1} \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}_{max}, \quad (1.3)$$

onde $a(t)$ é a resultante da aceleração da cabeça em múltiplos de g^7 (medida no centro de gravidade da cabeça) e t_1 e t_2 são quaisquer dois pontos no tempo, durante o intervalo de impacto, em que o HIC é máximo. Tal como para o SI, o valor de 1000 é especificado para o HIC como sendo o nível de tolerância para concussão em impacto frontal (contacto). Por razões práticas, o intervalo máximo de tempo (t_1-t_2), considerado para dar valores apropriados de HIC, foi fixado em 36 ms [46]. Este intervalo de tempo afecta fortemente o cálculo do HIC para impactos de longa duração, tal como impacto em *airbags* (duração: ± 50 ms). Mais tarde, este intervalo foi reduzido para 15 ms de maneira a que o HIC também fosse aplicável em impactos em *airbags*. O HIC tem-se revelado um discriminador razoável entre impactos graves e menos graves [47]. Contudo, HIC não se correlaciona bem com as lesões graves de impactos em várias direcções. Uma limitação importante do HIC é que as acelerações rotacionais não são tidas em conta, embora esta tenha vindo a ser debatida como sendo a principal causa de vários tipos de lesões traumáticas no cérebro, em particular, SDH (hematoma subdural) e DAI (lesão axonal difusa) [1, 21, 22]. Apesar destas limitações, HIC é actualmente o critério mais usado para as lesões na cabeça, em estudos.

Na tabela 1.6 [7] está representada a correlação entre os valores de HIC e de AIS (*Abbreviated Injury Scale*). O AIS, é uma descrição padronizada de lesões, que engloba os critérios de lesão cientificamente aceites. É uma ferramenta internacionalmente aceite, onde a gravidade das lesões é dada através de uma escala que vai de 1 (menos grave) até 6 (mais grave).

Tabela 1.6: *Abbreviated Injury Scale* e correspondentes valores de HIC (intervalo de 15 ms) [7].

HIC (15 ms)	AIS Code	Nível de concussão cerebral e de lesão na cabeça
135-519	1	Dores de cabeça ou tonturas
520-899	2	Inconsciente durante menos de 1 hora - Fractura linear
900-1254	3	Inconsciente durante 1-6 horas - Fractura com afundamento
1255-1574	4	Inconsciente durante 6-24 horas - Fractura aberta
1575-1895	5	Inconsciente mais de 24 horas - Hematoma grande
>1860	6	Não sobrevive

Maximum Resultant Head Acceleration

O *Maximum Resultant Head Acceleration* (a_{max}) é um critério de lesão da cabeça frequentemente usado devido à sua simplicidade. Os limites para a a_{max} estão relacionados com a sua aplicação, uma vez que a aceleração resultante é dependente do tempo. Para ter em conta esta dependência do tempo, este critério pode ser substituído/complementado por um valor da resultante da aceleração, que não deverá exceder um determinado intervalo de tempo.

1.3.2 Critérios de lesão baseados na combinação das acelerações translacionais e rotacionais da cabeça

Os critérios anteriormente discutidos, unicamente se preocupam com a resposta translacional da cabeça ao impacto. Contudo, a resposta biomecânica da cabeça durante um impacto também inclui movimentos rotacionais, que se acredita ser a uma forte causa de lesão. A tabela seguinte (tabela 1.7), de acordo com Prasad *et al.* [48], fornece, resumidamente, várias tolerâncias do cérebro humano para acelerações rotacionais (e velocidade rotacional).

⁷Aceleração da gravidade, $g = 9.81$ [m/s²].

Tabela 1.7: Tolerância humana à aceleração e velocidade rotacional relativamente ao movimento sagital da cabeça.

Extrapolado de	Tolerância	Tipo de pesquisa
concussão cerebral	50% probabilidade: for $t < 20$ [ms]: $\ddot{\alpha} = 1800$ [rad/s ²] for $t \geq 20$ [ms]: $\dot{\alpha} = 30$ [rad/s]	extrapolado de experiências em animais (dados especulativos)
ruptura das veias de ligação	$\ddot{\alpha} = 4500$ [rad/s ²] e/ou $\dot{\alpha} = 70$ [rad/s]	Modelos matemáticos em conjugação com dados experimentais de ruptura das veias de ligação
deslizamento do cérebro	$2000 < \ddot{\alpha} < 3000$ [rad/s ²]	Modelo matemático
cérebro (geral)	$\dot{\alpha} < 30$ [rad/s]: lleso: $\ddot{\alpha} < 4500$ [rad/s ²] AIS 5: $\ddot{\alpha} > 4500$ [rad/s ²] $\dot{\alpha} > 30$ [rad/s]: AIS 2: $\ddot{\alpha} = 1700$ [rad/s ²] AIS 3: $\ddot{\alpha} = 3000$ [rad/s ²] AIS 4: $\ddot{\alpha} = 3900$ [rad/s ²] AIS 6: $\ddot{\alpha} = 4500$ [rad/s ²]	Revisão de estudos experimentais e matemáticos

Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold, GAMBIT

Newman [49] tentou combinar a resposta da cabeça a acelerações translacionais e rotacionais num só critério de lesão. Considerando essas acelerações como a causa de tensões geradas no cérebro, das quais resultam lesões cerebrais, ele propôs o *Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold* (GAMBIT). A equação geral do GAMBIT é:

$$G(t) = \left[\left(\frac{a(t)}{a_c} \right)^n + \left(\frac{\ddot{\alpha}(t)}{\ddot{\alpha}_c} \right)^m \right]^{\frac{1}{s}}, \quad (1.4)$$

onde $a(t)$ e $\ddot{\alpha}(t)$ são valores instantâneos da aceleração translacional e rotacional, respectivamente; n , m e s são constantes empíricas seleccionadas para ajustar os dados experimentais disponíveis; e a_c e $\ddot{\alpha}_c$ são valores críticos das acelerações (tolerâncias).

Partindo do pressuposto de que as tolerâncias que derivam de testes com apenas movimentos translacionais ou movimentos rotacionais da cabeça são, igualmente válidas para resposta combinada da cabeça e, assumindo que a aceleração translacional e rotacional contribuem de igual modo para as lesões na cabeça, Newman simplificou a equação tornando-a:

$$G = \frac{a_m}{250} + \frac{\ddot{\alpha}_m}{10000} \leq 1, \quad (1.5)$$

com a_m [g] e $\ddot{\alpha}_m$ [rad/s²] valores médios das acelerações lineares e angulares respectivamente; 250 g é a aceleração linear, correspondente a 50% da probabilidade de AIS > 3; e 10000 rad/s² a aceleração angular, correspondente a 50% probabilidade de AIS > 3, de acordo com Newman.

O GAMBIT prevê lesão quando $G > 1$ e não prevê quando $G \leq 1$. Contudo, nunca foi extensamente validado como um critério de lesão (e.g. o intervalo máximo de tempo para a_m e α_m nunca foi definido).

Head Injury Power, HIP

Newman *et al.* [50] defendeu que o coeficiente de mudança da energia cinética translacional e rotacional, *i.e.* poder, poderia ser uma função biomecânica viável para avaliação de lesões na

cabeça. Uma expressão empírica para o HIP, que é uma medida relativa do poder da lesão na cabeça, poderia apresentar-se da seguinte forma:

$$\begin{aligned} HIP = & Aa_x \int a_x dt + Ba_y \int a_y dt + Ca_z \int a_z dt \\ & + \eta\alpha_x \int \alpha_x dt + \beta\alpha_y \int \alpha_y dt + \chi\alpha_z \int \alpha_z dt. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Cada termo desta expressão representa a mudança de energia cinética por um grau de liberdade. Os coeficientes A , B , C , η , β e χ denotam a sensibilidade à lesão por cada um dos 6 graus de liberdade da cabeça. O desenvolvimento desta função é descrita por Newman *et al.* [51]. A sensibilidade direccional da cabeça humana não é conhecida, portanto os coeficientes da equação 1.6 são ajustados afim de reflectir a massa e os momentos de inércia da cabeça humana. No mesmo estudo, os autores validaram o HIP usando dados experimentais, de análises cuidadas de colisões de jogadores de futebol americano, durante um jogo. Eles reconstruíram a cinemática da cabeça a partir de imagens televisivas e as lesões foram classificadas por médicos qualificados. Assim, para um HIP máximo (HIP_{max}) de 12.8 kW foi encontrado 50% de probabilidade de ocorrer concussão. O HIP_{max} não é validado para lesões mais graves do cérebro, uma vez que esses dados experimentais ainda não estão disponíveis. A partir dos seus resultados, os autores concluíram que HIP_{max} correlaciona-se melhor com lesões traumáticas leves do cérebro do que o HIC, destacando três vantagens do HIP_{max} em comparação com o HIC para chegar a essa conclusão, uma vez que, para além das acelerações translacionais, HIP_{max} consegue também incorporar: a sensibilidade direccional, a sensibilidade para acelerações rotacionais e a sensibilidade para velocidades angulares e translacionais.

1.3.3 Critérios de lesão baseados em tensões e deformações

Neste critério, a lesão do cérebro está relacionada com a tensão, a deformação e a taxa de deformação. Contudo, é necessário salientar que as deformações e as taxas de deformação dentro do cérebro (durante o impacto) são difíceis de medir. Ao longo dos anos, devido ao avanço das técnicas computacionais surgiram melhores e mais detalhados modelos numéricos do cérebro humano. Estes modelos dão uma avaliação mais pormenorizada e próxima da realidade das lesões, dado que permitem analisar as tensões e deformações ocorridas. Bandak [52, 53] desenvolveu três medidas, representando os tipos gerais de lesões do cérebro experienciadas em acidentes de tráfego:

- *Cumulative Strain Damage Measure;*
- *Dilatation Damage Measure;*
- *Relative Motion Damage Measure.*

As tensões e deformações usadas para calcular os parâmetros de lesão acima apresentados, são calculados a partir de simulações de elementos finitos, usando um modelo de elementos finitos do crânio e dos conteúdos intra-craniais.

Cumulative Strain Damage Measure

A *Cumulative Strain Damage Measure* (CSDM), é uma medida mecânica desenvolvida para avaliar os danos relacionados com deformações ocorridas no interior do cérebro, em impactos da cabeça. A CSDM é baseada na hipótese de que a DAI é associada a uma fracção de volume comutativo da

matéria de cérebro que sofreu uma deformação, à tracção, acima de um nível crítico. O volume de todos os elementos que sofreram uma deformação principal acima dos limites prescritos é calculado a cada incremento de tempo. O volume de cérebro afectado aumenta, monotonamente no tempo, durante as condições em que o cérebro está a sofrer deformações de alongamento à tracção e mantém-se constante para todas as outras condições (*i.e.* compressão, descarga, *etc.*). Bandak *et al.* [54] descobriram que o nível 5 da CSDM corresponde a um nível leve do DAI, e um nível 22 corresponde a uma gravidade moderada do DAI.

Dilatation Damage Measure

Esta segunda medida mecânica, avalia danos cerebrais causados por largas tensões de dilatação, e é designada por *Dilatation Damage Measure* (DDM). Esta medida monitoriza uma fracção acumulada de volume de cérebro sujeita a níveis de pressão negativos específicos. Contudo, nenhuma evidência directamente observada foi relatada sobre a relação entre o mecanismo de pressão e a produção de DAI ou outra lesão dos tecidos moles. O calculo desta medida é semelhante ao do CSDM. Assim, a cada espaço de tempo, o volume de todos os elementos que sujeitos a um nível de pressão negativa que exceda os limites prescritos é calculado. Com isto, é sugerido um valor de DDM de 5 para um limite de -14.7 psi (-101 kPa, valor de pressão de vapor de água) como limite de lesão. Contudo os autores indicaram que é necessária uma investigação mais aprofundada.

Relative Motion Damage Measure

A terceira medida mecânica proposta para a avaliação de lesões relacionadas com o movimento do cérebro relativamente à superfície interior do crânio, é designada por *Relative Motion Damage Measure* (RMDM). Esta medida controla o movimento tangencial da superfície do cérebro, resultante da combinação das acelerações translacionais e rotacionais da cabeça. Supõe-se que estes movimentos são a causa de hematomas subdórais associados a largas rupturas das veias parasagittais⁸ de acoplamento. Os níveis de tolerância para as referidas rupturas, são uma combinação da deformação e da taxa de deformação. O RMDM não requer a representação explícita das veias de acoplamento, mas sim a monitorização do deslocamento relativo dos vários pares de nós. Cada par representa uma veia de acoplamento entre o crânio e o cérebro junto do seio parasagittal. A medida tem em conta grandes modos de ruptura, enquanto deixa em aberto a possibilidade de usar outros, micro ou macro, modos de ruptura associados a um estado mais complexo de ligação vascular.

1.3.4 Discussão sobre os critérios de lesão da cabeça

Ao longo dos últimos anos, as funções que avaliam as lesões graves na cabeça têm evoluído, a maioria delas baseadas na curva de *Wayne State Tolerance* (figura 1.12). O critério de lesão da cabeça mais conhecido e mais aplicado é o HIC. Este é baseado na suposição de que a aceleração translacional resultante, é um indicador válido dos limites de lesão da cabeça. No entanto, ele apresenta falhas, uma vez que não tem em conta a aceleração rotacional e a direcção do impacto. Para além disso, não é claro o modo como este critério de lesão se relaciona com os mecanismos de lesão.

A única função de avaliação de lesão que tem em conta, tanto acelerações translacionais e rotacionais bem como a sensibilidade rotacional é o HIP_{max} . Contudo, apenas foi validada para traumatismos crânio-encefálico leves, e continua em estudo a aplicabilidade desta função para lesões mais graves, como as que ocorrem em acidentes de viação.

⁸Veias que limitam o movimento do cérebro relativamente ao crânio.

O DDM é um critério de lesão baseado na pressão. Contudo, tal como os próprios autores referiram, não existe nenhuma observação directa que evidencie a relação da pressão crânio-encefálica e a lesão na cabeça, pelo que este critério de lesão poderá não ser adequado. O RMDM é fortemente dependente de um modelo correcto da interface entre o cérebro e o crânio. No entanto, o comportamento mecânico desta interface não é ainda conhecido, estando em curso algumas investigações. Se a interface for modelada correctamente, o RMDM é potencialmente um bom critério de lesão para prever o SDH. O CSDM é o critério mais promissor baseado em tensão-deformação, pois é baseado, provavelmente no mais importante parâmetro de lesão na cabeça, a deformação, e para além disso é o critério menos afectado por incertezas. Contudo, todos os critérios baseados em tensões e deformações referidos anteriormente, têm por base modelos de elementos finitos da cabeça que, ainda não são validados para tensões e deformações reais dentro da cabeça.

Por fim, a última observação diz respeito aos níveis de tolerância para os critérios de lesão. A escolha do nível de tolerância depende da cabeça utilizada, da aplicação, e do nível de risco de lesão associado. Por exemplo, o nível de tolerância para o HIC num capacete na norma ECE-R.22, usando uma cabeça rígida é de 2400. Contudo o nível de tolerância para o HIC num *crash test* de carros, na norma FMVSS 208 [36], usando a cabeça *Hybrid III* é de 1000.

1.4 A cortiça: um material celular natural

1.4.1 Origem e crescimento

A cortiça é um material celular natural que constitui a parte exterior da casca do sobreiro (*Quercus Suber L.*). O sobreiro é uma árvore de crescimento lento mas longo, vivendo geralmente entre 250 a 350 anos, estando apenas na produção activa de cortiça até aos 150 a 200 anos. Durante este período, e em intervalos mínimos de 9 anos, que, dadas as condições climáticas em Portugal é o tempo necessário para se atingir um crescimento de cerca de 27 mm (espessura mínima requerida pela indústria rolheira), a cortiça é extraída por corte e arrancamento sobre a forma de pranchas. Na figura 1.14 podem ver-se algumas pranchas de cortiça após extracção do sobreiro.

Após a remoção da cortiça, a camada que lhe dá origem (o *felogénio*) é destruída. Contudo, o sobreiro tem a capacidade de regenerar, no interior do *entrecasco* uma camada designada por *felogénio traumático*, pois resulta de um trauma causado pelo descortiçamento, dando assim origem a uma nova camada formadora de células de cortiça. É esta capacidade de regeneração do *felogénio*, em resposta ao descortiçamento, que permite a exploração sustentada do sobreiro ao longo da sua vida, através de sucessivas extracções de cortiça.

Esta extracção, feita por meio de cortes tangenciais e longitudinais efectuados na casca da árvore com auxílio de um machado, ocorre geralmente no fim da Primavera e Verão, e é designada por *descortiçamento* ou *desbóia*. Esse período encontra-se especificado no Decreto-Lei 11/97 de 14 de Janeiro, e é designado por "idade legal da cortiça".

Por volta dos 25-30 anos de idade, altura em que a árvore atinge as dimensões propostas pela autoridade florestal (diâmetro entre 20-25 cm), ocorre o primeiro *descortiçamento*, dando origem à cortiça *virgem*. Esta cortiça, apresenta uma estrutura e superfície irregulares, resultantes das fracturas que ocorreram devido às fortes tensões tangenciais originadas pelo crescimento radial do tronco, não sendo por isso utilizadas no fabrico de rolhas. Assim sendo, é geralmente triturada, destinam-se exclusivamente ao fabrico de aglomerados.

A segunda geração de cortiça é designada por cortiça *secundária*, que apesar de apresentar uma melhor qualidade, ainda não é a melhor. Nesta geração, as tensões resultantes do crescimento do tronco são ainda consideráveis, levando ao aparecimento de fendas que impedem o seu uso no fabrico de rolhas.

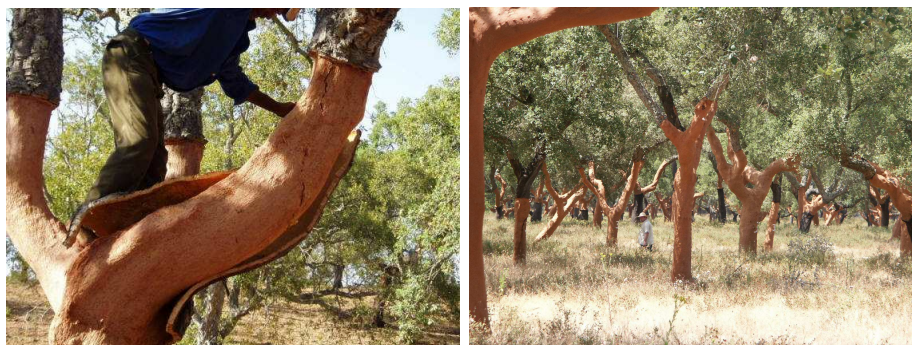


Figura 1.13: Descortiçamento de um sobreiro e aparência dos sobreiros após extracção da cortiça.

Por fim, após a remoção desta camada é finalmente formada, nas gerações seguintes, uma camada de cortiça de espessura bastante uniforme, com poucas fendas e de pequena profundidade e com a espessura requerida, designada cortiça *amadia*, constituindo a matéria prima da industria rolheira. A primeira extracção desta cortiça ocorre normalmente aos 40-50 anos de idade do sobreiro e prolonga-se, em intervalos de 9 anos, como já foi referido, até ao fim da vida activa do sobreiro.



Figura 1.14: Pranchas de cortiça empilhadas após extracção do sobreiro [55].

Como foi referido, para além da cortiça *virgem* e *secundeira*, são utilizadas no fabrico de aglomerados, desperdícios de operações de fabrico de rolhas e de outros produtos de cortiça *amadia*. Existem dois tipos básicos de aglomerados: (i) *aglomerados negros*, constituídos unicamente por grãos de cortiça e (ii) *aglomerados compostos*, que para além dos grãos de cortiça incorporam materiais adesivos (resinas aglomerantes, óleo de linhaça ou borracha).

1.4.2 Produção, transformação e comercialização de cortiça

O montado de sobreiro tem um contributo muito importante para a economia e ecologia de vários países do mediterrâneo, ocupando uma área mundial de cerca de 2 277 700 hectares (tabela 1.8).

Portugal aparece em primeiro lugar concentrando cerca de 33% da área mundial, o correspondente a mais de 730 mil hectares, cerca de 23% da floresta nacional, constituindo deste modo a espécie florestal mais abundante no nosso país.

Tabela 1.8: Área de montado de sobro em diversos países [55].

Área de montado de Sobro		
País	Área	Percentagem %
Portugal	736 700	32.4
Espanha	506 000	22.2
Argélia	414 000	18.2
Marrocos	345 000	15.2
França	92 000	4
Tunísia	92 000	4
Itália	92 000	4
TOTAL	2 277 700	100

A liderança de Portugal neste sector, é ainda reforçada pelo facto de Portugal ser o maior produtor de cortiça, com mais de 150 mil toneladas anuais, o que representa cerca de 52.5% da produção mundial (que atingem valores próximos de 300 mil toneladas). Para além disso, Portugal é, segundo dados da *United Nations Statistic Division*, líder no que diz respeito às exportações com 60% da quota mundial, valor este que sobe para 80% no que diz respeito a transacções de produtos já transformados.

Percebe-se assim a importância que este sector tem na economia nacional. De facto, 90% da cortiça transformada em Portugal tem como destino mercados internacionais, o que, no ano de 2007, representou cerca de 853.8 Milhões de euros, com 159 Mil Toneladas de produtos exportados. Este valor é bastante significativo, representando perto de 0.7% do PIB (preços de mercado), 2.3% do total de exportações do nosso país, e aproximadamente 30% das exportações de produtos florestais.

O processamento industrial da cortiça está dividido em 4 sub-sectores, que comportam cerca de 1100 estabelecimentos fabris em todo o país, representando 25% do valor total de emprego no sector florestal. Os 4 sub-sectores são:

Preparador: ocupa-se de operações posteriores à extracção da cortiça como a cozedura, o traçamento, o recorte, a escolha e o enfardamento;

Transformador: dedica-se fundamentalmente à produção de rolhas e discos de cortiça natural, a partir da prancha; esta actividade está quase sempre associada à aglomeradora;

Granulador: trata da trituração da cortiça de qualidade inferior e das aparas resultantes do fabrico de rolhas (desperdícios das actividades de preparação e transformação). Os granulados podem ser utilizados como produtos ou matérias-primas das actividades aglomeradoras;

Aglomerador: cuida da produção de aglomerado expandido puro (negro) e do aglomerado composto (com a adição de aglutinantes), que está na base de vários produtos (rolhas e discos de aglomerado, revestimentos de pavimentos e paredes, juntas isoladoras).

O sector transformador é o que ocupa a posição de maior destaque em Portugal, e detém a maior capacidade industrial e empresarial do mundo para a transformação, transformando cerca de 70% da cortiça, e exportação dos produtos derivados já transformados. A produção de rolhas (sector transformador), representa a principal actividade ligada à industria da cortiça com cerca

de 61% dos produtos fabricados, seguido da produção de aglomerados com 33% e dos granulados com cerca de 6% [55].

Deste modo, o sector vinícola é o principal consumidor dos produtos em cortiça, recolhendo aproximadamente 60% de toda a produção de cortiça, a que se segue o sector da construção civil com cerca de 15%, e 11% do sector automóvel [56].

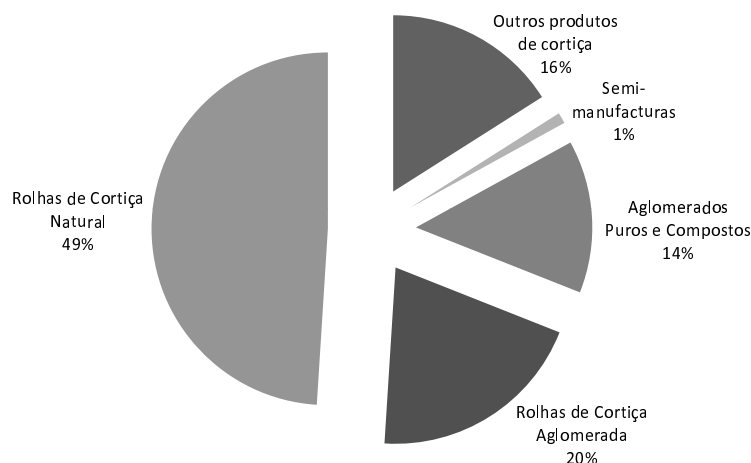


Figura 1.15: Estrutura das vendas de Cortiça por tipo de produtos [55].

Assim, a cortiça possui uma vasta gama de aplicações que vão desde o fabrico de rolhas a utensílios de cozinha, artigos de artesanato, solas para calçado, revestimentos de paredes e tectos, juntas para motor, queima para produção de energia, painéis para indústria aeroespacial e militar, isolantes térmicos, entre muitas outras aplicações.

Por outro lado, apesar de ser uma característica que muitas vezes não é valorizada mas que, nos dias de hoje é muito importante é o facto de a cortiça ser um material totalmente reciclável [57].

De acordo com os números apresentados torna-se óbvio que o sobreiro, e em particular a cortiça constituem um património e uma riqueza que devem ser preservados e valorizados. Muito embora a cortiça seja um material de qualidades inquestionáveis, a sua utilização é ainda muito vaga. Neste sentido, uma forma de valorizar este material passa pela realização de novos estudos afim de a caracterizar e de descobrir novas áreas de aplicação, como por exemplo a absorção de impacto.

1.4.3 Estrutura da cortiça

A primeira referência escrita sobre a cortiça é, aparentemente de Plínio, o Velho (77 d.C.), que nos diz que *"O sobreiro é uma planta pequena; o único produto útil que origina é a casca, muito espessa, e que, uma vez removida, volta a crescer...Por isso, a árvore é designada pelos Gregos por árvore-da-casca."* Plutarco, vinte anos mais tarde refere a utilização de cortiça, por parte dos romanos, em barcos por volta do ano 400 a.C. Efectivamente, a cortiça ocupa uma posição especial na História da Ciência. De facto, foi a partir da observação da cortiça ao microscópio óptico que Robert Hooke, em 1664, descobriu a unidade básica das plantas e dos tecidos biológico, ao qual deu o nome de célula, palavra que deriva do latim *cella*, que significa pequeno compartimento.

"(...) pude perceber claramente que toda a cortiça era porosa e perfurada, assemelhando-se a um favo de mel (...) esses poros ou células não eram muito profundos e eram semelhantes a um

grande número de pequenas caixas.” [58]

Com este feito, Hooke registou pela primeira vez, em desenho (figura 1.16), a estrutura celular da cortiça num dos livros que mais impacto teve no desenvolvimento científico e cultural do Século XVII, designado *Micrographia* [58].

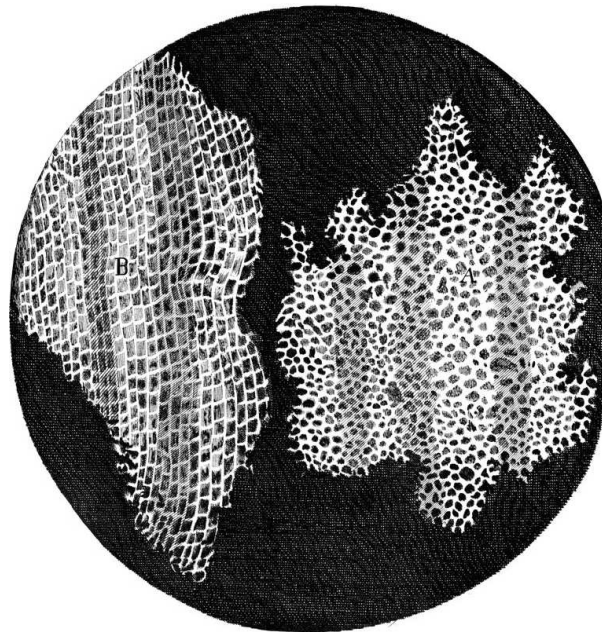


Figura 1.16: Desenhos de Robert Hooke da estrutura da cortiça [58].

Hooke foi o primeiro a detectar a anisotropia da cortiça. De facto, de acordo com os seus desenhos (figura 1.16) as células à esquerda apresentam-se alongadas, semelhantes a paralelepípedos, e dispostas em fiadas contínuas, e à direita apresenta uma estrutura relativamente isotrópica composta por células aproximadamente hexagonais. Esta descrição simplista da estrutura da cortiça, veio posteriormente a ser confirmada por vários autores. Com base nestas observações, é habitual referir três direcções principais que definem a orientação da cortiça no sobreiro: (i) a direcção radial (ao longo do raio do tronco), (ii) a direcção axial (ao longo do tronco) e (iii) a direcção tangencial (tangencial à circunferência do tronco).

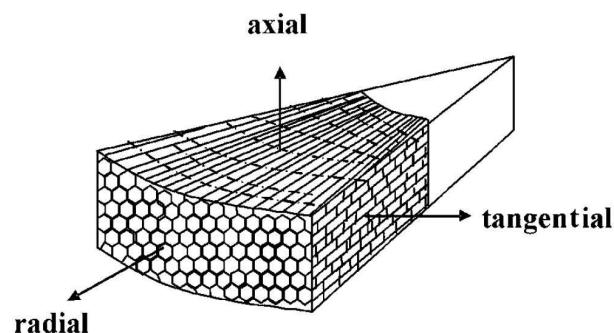


Figura 1.17: Representação esquemática da disposição das células de cortiça no tronco, definindo as três direcções [59].

Presentemente, utilizando microscópios electrónicos de varrimento, as observações já permitem visualizar em mais detalhe a microestrutura da cortiça (figura 1.18). Assim, e de uma forma

simplificada, as células apresentam-se, segundo a direcção radial com geometria prismática hexagonal, empilhadas em colunas, com a base desalinhada. As células de uma mesma coluna são geradas, uma após outra, pela mesma célula de felogénio e não existe correlação entre as alturas das células de cortiça em colunas adjacentes. Nesta direcção, as células apresentam-se ainda onduladas, pelo que geralmente se afirma que têm uma estrutura em forma de concertina. Este acontecimento é devido ao facto de as novas células terem de empurrar as células de cortiça já formadas, e as tensões de compressão que daí resultam, provocam encurvadura⁹ nas paredes laterais. A estrutura da cortiça é bastante mais complexa e desorganizada do que acabou de ser descrita, sendo que as dimensões das células variam bastante, quer de cortiça para cortiça, quer numa mesma prancha de cortiça. Efectivamente, a altura do ano em que se deu o crescimento das células de cortiça no sobreiro influencia a sua forma. Assim, as células de início de estação (células de Primavera) são mais longas radialmente e as paredes apresentam-se mais finas do que as células de fim de estação (células de Outono), que são mais curtas e de paredes mais espessas. As células de Outono apresentam paredes laterais menos onduladas em relação às células de Primavera, pois devido à maior espessura das paredes, elas tornam-se mais resistentes à flexão e à encurvadura provocada pelo seu crescimento [60].

Na figura 1.19 pode ver-se, de uma forma esquemática a estrutura e as dimensões médias de uma célula de cortiça. Deste modo, as células têm geralmente uma altura média de $45\mu\text{m}$, um lado de base hexagonal de aproximadamente $20\mu\text{m}$ e espessura média da parede celular de cerca de $1\mu\text{m}$.

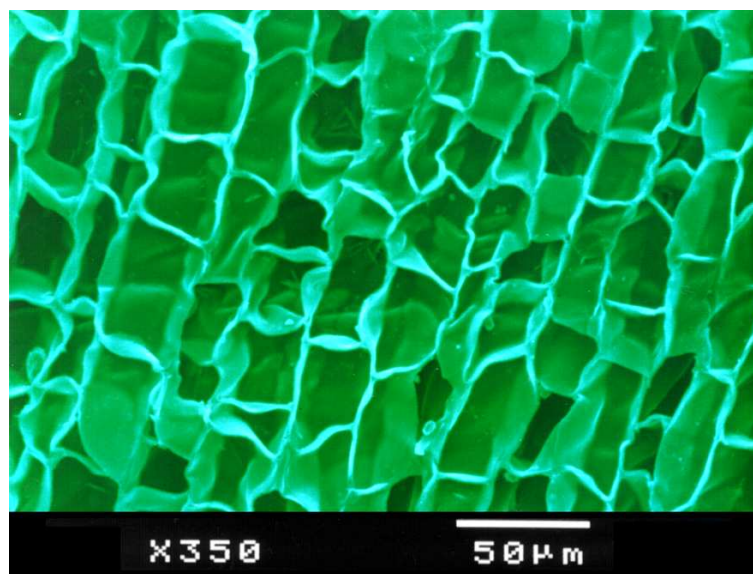


Figura 1.18: Observação com microscópio electrónico de varrimento da estrutura celular da cortiça na direcção radial [55].

A cortiça, tal como outros materiais celulares, é constituída por células fechadas que formam no espaço uma estrutura tridimensional, e as suas propriedades resultam, em grande parte, da densidade relativa e da sua constituição química. A fracção volúmica de material sólido na cortiça é cerca de 15% do volume total. As paredes celulares da cortiça são constituídas, na sua maioria, pela *suberina*, um biopolímero de carácter lipídico, ao qual se atribuem em grande parte as suas características mecânicas.

Para além da suberina, a cortiça é constituída pelos polisacarídios *celulose* e *hemiceluloses*, pelo polímero aromático textitlenhina e por *extractivos*. Estes componentes não são exclusivos da

⁹Do inglês: *buckling*.

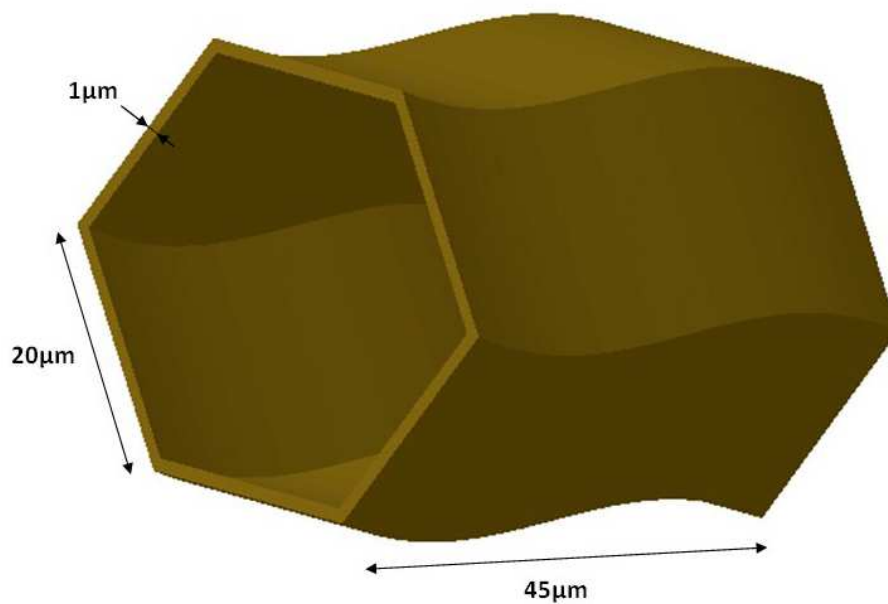


Figura 1.19: Representação esquemática de uma célula de cortiça.

cortiça e existem noutros tecidos vegetais, por exemplo, nas madeiras.

Assim, a generalidade das propriedades mecânicas da cortiça pode ser explicada pela sua estrutura celular. O facto de ser formada por células ricas em suberina permite que estas apresentem uma elevada impermeabilidade, baixa condutividade térmica e acústica e ainda uma elevada resiliência e capacidade de absorção e dissipação de energia. A presença de células abertas à superfície explica o facto de esta possuir um elevado coeficiente de atrito.

Em suma, a cortiça apresenta as seguintes propriedades:

1. Baixa densidade;
2. Elevada deformabilidade e baixa resistência à deformação;
3. Baixo coeficiente de Poisson;
4. Grande capacidade de absorção de energia (em impacto);
5. Grande capacidade de dissipação de energia (em vibrações);
6. Elevado coeficiente de atrito;
7. Baixa condutividade térmica;
8. Boa inércia química;
9. Baixa absorção de água e outros líquidos;
10. Boa resistência ao fogo.

A grande variabilidade nos valores de determinadas propriedades da cortiça, pode ser explicado pelo facto de esta ser um material celular e anisótropico. De facto, como já foi referido anteriormente, até as próprias dimensões das células de cortiça variam com a época sazonal em que ocorreu o seu crescimento. Outra dificuldade na sua caracterização consiste na presença de

defeitos, como o *bofe*, o *verde* ou o *enguiado da costa*, e da alteração da porosidade na sua estrutura.

Os canais lenticulares, usualmente designados por *poros* são uma causa conhecida de dispersão de valores das propriedades mecânicas da cortiça. Estes têm origem nas *lenticulas*, pequenas regiões no felogénio onde não há produção de células de cortiça, e permitem trocas gasosas entre o tronco e o exterior, atravessando a cortiça na direcção radial, não devendo ser considerados defeitos, uma vez que a sua presença é necessária. Os poros têm um papel importante na propriedades globais da cortiça, constituindo o principal factor para a definição de qualidade de uma prancha de cortiça [60].

O bofe é uma descontinuidade importante do tecido suberoso, com porosidade muito elevada, devido à existência de canais com diâmetros elevados. O verde advém do facto de existir cortiça que contém áreas com elevado teor de humidade (400-500%) rodeadas por cortiça com teor de humidade normal (cerca 6-8% quando seca ao ar). Por ultimo, o enguiado da costa consiste da existência de fendas acentuadas e dirigidas axialmente, na costa das pranchas de cortiça, podendo estas estender-se até às primeiras camadas de cortiça subjacentes [60, 61].

1.4.4 Estado de arte

Vários autores debruçaram-se os aspectos fundamentais do comportamento mecânico *quasi*-estático da cortiça. As características de deformação das paredes das células de cortiça bem como a sua estrutura, quando ensaiadas à tracção e à compressão foram analisadas em pormenor por Gibson *et al.* [62]. Estes autores, compararam expressões teóricas baseadas na deformação da estrutura celular da cortiça segundo as três direcções principais (radial, axial e tangencial), com o módulo de Young e as propriedades mecânicas medidas experimentalmente.

Também Gibson e Ashby, no livro *Cellular Solids* escrito em 1997, trataram com grande detalhe a teoria da deformação das paredes de materiais celulares, em particular da cortiça, sob diversas solicitações [63]. Dart e Guth abordaram os aspectos relacionados com a relaxação de tensões, fluência e recuperação de dimensões da cortiça [64]. Posteriormente, Rosa e Fortes estudaram o efeito da velocidade de deformação, escolhendo três velocidades de deformação diferentes nas três direcções anteriormente referidas, no comportamento da cortiça em compressão, considerando a anisotropia do material [65]. Analisaram ainda a recuperação de dimensões após compressão, chegando à conclusão de que a taxa de recuperação aumenta com o grau de deformação inicial e diminui significativamente com o tempo. Os mesmos autores, noutra publicação [66], evidenciam o seu estudo sobre a relaxação e a fluência da cortiça em compressão, nas mesmas três direcções. Realizaram também ensaios cíclicos de carga-relaxação-descarga em compressão, nas direcções radial e tangencial, para estudo do comportamento de rolhas de cortiça.

Mais recentemente Mano, utilizando uma técnica designada por *Dynamic Mechanical Analysis* estudou as propriedades viscoelásticas da cortiça, numa gama de temperaturas entre -40 e 120°C [67]. Com este estudo, este autor determinou os módulos de armazenamento e de perda, discutiu e comparou-os com resultados obtidos por outras técnicas de medição. No seguimento deste trabalho, Mano realizou ainda ensaios de fluência na cortiça sob compressão, numa gama de temperaturas entre 0 e 50°C, avaliando o comportamento de relaxação de tensões [68].

Pereira *et al.* [69] e Pina e Fortes [70], estudaram os mecanismos de deformação da cortiça, quando sujeita a solicitações variadas, que são imprescindíveis para a caracterização do comportamento mecânico da mesma. Os mecanismos de crescimento das células da cortiça no sobreiro e a influência que estes têm nas propriedades mecânicas do próprio material foram estudados por Pereira *et al.* [71] e por Fortes e Rosa [72]. Assim, estes autores, verificaram tensões tangenciais de tracção crescentes e tensões radiais de compressão decrescentes com o aumento da distância ao eixo do sobreiro. Com isto, analisaram algumas consequências do mecanismo de crescimento de tensões no tronco do sobreiro como (i) deformações nas pranchas quando se dá

o descortiçamento, (ii) ondulações das paredes celulares, (iii) variação de largura dos anéis de crescimento e (iv) aparecimento de fissuras. Os autores, neste estudo, mostraram ainda que os valores da resistência à compressão e o módulo de Young da cortiça são influenciados negativamente por uma maior taxa de crescimento da mesma no sobreiro.

Um dos principais obstáculos para a caracterização da cortiça, para além de ser um material celular, prende-se com o facto de esta possuir uma variabilidade estrutural muito grande. Com efeito, uma mesma prancha de cortiça contém células de Primavera e de Outono, com características distintas. É importante por isso estudar os factores que envolvem e influenciam esta variabilidade, de maneira a averiguar formas de controlo de qualidade estrutural e química. Costa *et al.* [73], estudou a variabilidade do crescimento radial em sobreiros adultos, sugerindo assim dados úteis para a optimização do tempo de ciclo de produção, considerando a espessura das pranchas, o tempo de extracção e as curvas de crescimento da cortiça no sobreiro, de maneira a que a extracção das pranchas de cortiça seja feita no momento certo, afim de se obter o produto com determinadas características, nomeadamente uma determinada espessura. O mesmo autor, estudou também a influência das características do solo, do declive e do escoamento de montados no crescimento do sobreiro no sudeste de Portugal [74].

A relação entre a porosidade e o comportamento da cortiça à compressão foi estudado por Anjos *et al.* [75].

O atrito da cortiça em contacto com outros materiais foi estudado por Vaz e Fortes [76]. Estes autores mostraram a dependência do coeficiente de atrito com a tensão de compressão, velocidade de deslizamento e humidade da amostra, tendo obtidos valores, para o coeficiente, entre 0.4 e 1.2. Marat-Mendes e Neagu [77] examinaram a relação entre o teor de humidade da cortiça com as suas propriedades eléctricas, bem como o processo de relaxação dieléctrica. Mais recentemente, os efeitos da compressão axial e da taxa de torção nos valores do módulo de corte da cortiça, foram analisados por Rosa *et al.* [78].

Também Parralejo *et al.* [79], analisaram as propriedades mecânicas da cortiça, quando sujeita a tensões de contacto, fazendo ensaios de indentação. Na realização dos ensaios de indentação, os autores propuseram uma nova metodologia e fizeram ainda uma estimativa dos valores dos módulos elásticos em direcções específicas.

Fortes e Rosa realizaram também estudos para tentarem perceber qual a influência de gás no interior das células de cortiça nas suas propriedades mecânicas [80], asseguraram que, para deformações até 70% o seu contributo pode ser desprezada. Os mesmos autores, noutra investigação [81], analisaram as propriedades relacionadas com a fractura do material quando solicitado à tracção, observando os principais modos de fractura, sendo estes (i) propagação de fissuras ao longo das paredes celulares laterais em tracção não-radial e (ii) propagação de fissuras por rotura das paredes celulares em tracção radial. Posteriormente, Rosa *et al.* estudaram os parâmetros referentes à absorção de água pela cortiça e os seus efeitos no comportamento mecânico da mesma, considerando a sua anisotropia [82]. Neste sentido, observaram dois regimes de absorção, (i) um período em que existem alterações dimensionais e (ii) um período apenas com alteração de massa. Gil *et al.* também se debruçou neste tema [83]. Fortes e Nogueira realizaram uma análise pormenorizada dos mecanismos de deformação da cortiça e estudaram o efeito de Poisson [84].

Existem também vários estudos sobre cortiça aglomerada. Gil analisou, através de microscopia electrónica e em duas direcções (paralela e perpendicular ao eixo de compressão), amostras de aglomerado puro (negros) antes e depois de diferentes tipos de densificação, ocorrida em condições previamente definidas. Observou ainda, a relação entre a distância média das paredes das células da cortiça e a compressão aplicada, bem como a influência dos tratamentos de densificação na composição química do aglomerado [85, 86].

A relação entre a estrutura e molhabilidade de alguns adesivos utilizados no fabrico de

aglomerados compostos de cortiça e as propriedades desses aglomerados foi estudado por Teixeira *et al.* [87]. Estes autores, realizaram ensaios de compressão e flexão em três pontos para determinar o comportamento mecânico do aglomerado, e observaram a sua estrutura com microscópio electrónico.

Gómez-Serrano *et al.* estudaram a densidade de aglomerados negros e compostos, fabricados a partir de desperdícios de cortiça, e analisaram o efeito do tamanho das partículas e do teor de resina na densidade aparente dos aglomerados [88].

A incorporação de granulados de cortiça em argamassa polimérica, e o estudo do seu comportamento mecânico foi analisado por Nóvoa *et al.* através de ensaios de compressão e de flexão até à ruptura com diferentes argamassas, variando o teor volúmico de cortiça de 0 a 45%. Neste estudo, os autores estudaram não só a influência da fracção volúmica da cortiça mas também a influência da fracção mássica de resina/areia no comportamento mecânico da argamassa [89].

Mais recentemente, Carvalho e Silva [90] estudou a incorporação de cortiça em argamassa afim de melhorar a resposta sísmica de edifícios. Para tal, a autora estudou primeiramente a constituição do material compósito, fazendo variar a dimensão do granulado de cortiça e a sua fracção volúmica, de forma a determinar a influência destes dois factores no comportamento da argamassa. Realizou a análise do comportamento mecânico à compressão, deformação na ruptura e modulo de elasticidade inicial, e por fim realizou ensaios para caracterizar o seu comportamento cíclico, afim de avaliar o desempenho destas argamassas e da sua aplicabilidade como dissipadores de energia.

Fortes *et al.* divulgaram, em 2004, o primeiro livro científico sobre a cortiça, *A Cortiça* [60], que divulga de uma forma rigorosa conhecimentos científicos obtidos até esta data, sobre a cortiça. Mais recentemente, no seguimento deste tema, Helena Pereira publicou o livro, *Cork: Biology, Production and Uses* [91]. Estes livros abrangem informação sobre a formação e crescimento da cortiça; a sua estrutura e composição química; a qualidade da cortiça; propriedades físicas como a densidade, a resistência ao desgaste e as propriedades térmicas, eléctricas, viscoelásticas e acústicas; as propriedades e o comportamento mecânico à compressão, tracção, fractura e torção; os produtos quer de cortiça natural, quer de cortiça aglomerada; entre outras.

No geral, o comportamento mecânico da cortiça tem sido alvo de diversos estudos, que maioritariamente tendem a focar as solicitações *quasi-estáticas* a que a cortiça está sujeita dentro do gargalo de uma garrafa e sempre com a finalidade de melhoria do desempenho deste material na indústria rolheira. São exemplo disso os estudos sobre a viscoelasticidade, a fluência e a relaxação de tensões; as publicações sobre o coeficiente de Poisson, a influência da humidade e porosidade no material; os avanços nos mecanismos de crescimento e fractura da cortiça com o intuito de conhecer os parâmetros que afectam directamente a qualidade das pranchas de cortiça, *etc.* Os estudos sobre atrito, amortecimento de vibrações e isolamento acústico têm sido em grande parte motivados pelo mercado centrado no uso de painéis de aglomerado para a construção civil [61].

De facto, só recentemente é que começaram a existir estudos sobre outras aplicações de cortiça, nomeadamente solicitações de impacto e utilização deste material em sistemas de absorção de energia. Gameiro *et al.* [92, 93], estudaram, através de ensaios numéricos e experimentais, o comportamento dinâmico de diferentes tipos de cortiça, quando solicitada em compressão, a diferentes taxas de deformação. Paralelamente, de maneira a estudarem a viabilidade de utilização de cortiça como material com capacidade de absorção de energia de impacto em componentes estruturais, os autores analisaram o comportamento de tubos de alumínio de secção circular e quadrangular, com e sem cortiça confinada, submetidos a diferentes velocidades de deformação. Com isto, verificaram primeiramente que os resultados obtidos através do programa de simulação numérica LS-Dyna™ encontravam-se em razoável conformidade com os resultados experimentais, e por fim, os resultados obtidos com os tubos que continham cortiça confinada, mostravam-se

bastante satisfatórios no que diz respeito à absorção de energia, e que a potencialidade deste material neste tipo de utilização é bastante elevada. Na sequência deste estudo Gameiro e Cirne [94] analisaram as características de tensão-deformação, a capacidade de absorção de energia e as transições entre modos de colapso para tubos circulares, com e sem cortiça confinada, fazendo variar o seu diâmetro, a espessura e o comprimento do tubo. Seguidamente, Gameiro *et al.* [95] ensaiaram numericamente, em LS-Dyna™, tubos de secção circular e quadrangular, com e sem cortiça no seu interior, sujeitos a impacto uniaxial a velocidades de 10 a 15 m/s. Concluíram com isto que, para as geometrias estudadas, o confinamento de cortiça aumenta significativamente a capacidade de absorção de energia, e que quer os modos de deformação quer a capacidade de absorção de energia são influenciados pela espessura do tubo.

Mais recentemente, Santos [96] estudou numericamente os benefícios da implementação de *padding* (estruturas construídas com materiais com boa capacidade de absorção de energia, colocadas estrategicamente em zonas de impacto críticas) de cortiça micro-aglomerada no interior das portas laterais dos veículos, fundamentalmente em termos de protecção da zona pélvica dos ocupantes. Neste trabalho, a autora comparou a capacidade de absorção de energia da cortiça com outros materiais usados frequentemente para esse fim, obtendo resultados bastante satisfatórios.

O conteúdo deste trabalho tenta aliar a boa capacidade de absorção de energia por parte da cortiça, verificada por vários autores, com a capacidade quase única que a mesma apresenta no que diz respeito ao seu retorno elástico, sem perda substancial de propriedades. Com efeito, para além da cortiça ser um material com capacidade de absorção de energia de impacto, apresenta baixa densidade, boa resiliência e estabilidade química, impermeabilidade a líquidos e boa resistência ao fogo e ao desgaste. É ainda um material reciclável e reutilizável, ecológico, higiénico e de fácil manutenção e durabilidade.

Capítulo 2

Objectivos e Guia de Leitura

2.1 Objectivos

De uma forma genérica, o objectivo deste trabalho consiste no estudo do comportamento mecânico de componentes estruturais para protecção contra impacto em capacetes rodoviários. Estes componentes são utilizados como absorvedores de energia e têm como principal função diminuir o perigo de lesão para os seus utilizadores. Com isto, a vertente inovadora da investigação deste trabalho prende-se com a análise da viabilidade da utilização de cortiça, nesses componentes.

Assim, avalia-se o benefício da utilização de micro-aglomerado de cortiça em aplicações concretas de segurança passiva de capacetes rodoviários, através da substituição do tradicional *padding* em poliestireno expandido, por este material. Para tal, são realizados estudos numéricos, primeiramente para acerto do modelo numérico de comportamento de cada material, e por fim de impactos normalizados, afim de determinar o desempenho do capacete utilizando os dois tipos de *padding*.

De uma forma detalhada, os objectivos deste trabalho são os seguintes:

- Revisão do estado de arte nos âmbitos da segurança passiva em capacetes rodoviários, normas de ensaios e critérios de lesão da cabeça;
- Acertar os parâmetros dos modelos numéricos de comportamento dos diferentes materiais através da realização de ensaios numéricos;
- Estabelecimento de uma metodologia de simulação numérica eficiente e fiável;
- Desenvolver um conjunto de ensaios numéricos de simulação de impacto em diferentes pontos do capacete, conforme a norma ECE-R.22/05, utilizando *padding* em EPS e cortiça micro-aglomerada, sobre uma plataforma de impacto plana;
- Comparar os resultados obtidos, em termos do pico de aceleração máxima do centro de gravidade do modelo da cabeça e dos valores de HIC calculados, e verificar se estes estão dentro dos limites estabelecidos pela norma reguladora. Neste ponto é avaliado o modelo de capacete desenvolvido através da comparação com resultados experimentais, e para além disso avaliar o benefício da incorporação de cortiça micro-aglomerada no *padding* de absorção de energia do capacete através da comparação dos resultados numéricos obtidos.

2.2 Guia de leitura

O trabalho que aqui se apresenta está dividido em seis capítulos. Afim de fornecer ao leitor um guia de leitura prático, é elaborado, de seguida, um guia de leitura onde são descritos resumidamente

os conteúdos de cada capítulo.

Capítulos 1 e 2 - Enquadramento e Objectivos

Nesta primeira parte apresentam-se os tópicos envolvidos e tratados durante o desenvolvimento da dissertação e explicam-se conceitos relativos à protecção contra impacto e absorção de energia. Referem-se alguns materiais tipicamente utilizados em situações de impacto e descreve-se mais especificamente a cortiça e as suas potencialidades. Inclui-se a revisão bibliográfica referente a trabalhos de investigação realizados que se contextualizem neste projecto, bem como uma revisão bibliográfica das diferentes normas de testes e critérios de lesão da cabeça. Nos capítulos 2 e 3 apresentam-se os objectivos deste trabalho e é fornecido um guia de leitura prático desta dissertação.

Capítulo 3 - Ensaaios de Caracterização

Neste capítulo são descritos os procedimentos e métodos utilizados na caracterização do comportamento mecânico dos materiais envolvidos no âmbito deste trabalho. Realizam-se simulações numéricas em Abaqus™ em poliestireno expandido (EPS) e cortiça micro-aglomerada afim de conseguir um ajuste da curva de comportamento ao modelo adoptado para simular cada material.

Capítulo 4 - Modelação Numérica

Neste capítulo faz-se uma pequena introdução aos princípios básicos da formulação do Método dos Elementos Finitos (MEF), e descreve-se brevemente o programa Abaqus™, utilizado para a realização das simulações numéricas. Apresenta-se a metodologia usada para a construção do modelo em superfícies e posterior discretização, bem como os ensaios numéricos de impacto realizados de acordo com a norma ECE-R.22, utilizando *padding* e coroa em EPS e cortiça.

Capítulo 5 - Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas simulações numéricas, realizadas em Abaqus™, nos diferentes impactos realizados num capacete rodoviário com *padding* em cortiça micro-aglomerada ou EPS. Os resultados de interesse no âmbito da segurança passiva, de acordo com a norma ECE-R.22 - pico de aceleração máxima e valores de HIC - são confrontados. Numa primeira fase, são confrontados com resultados obtidos experimentalmente, afim de verificar se o modelo é ou não viável. Por fim, avaliam-se as diferenças e os benefícios da implementação de um *padding* de cortiça micro-aglomerada.

Capítulo 6 - Discussão e Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais e discutem-se os resultados obtidos na realização deste trabalho. Para terminar são apresentadas algumas sugestões a desenvolver em trabalhos futuros.

Parte II

Caracterização Mecânica dos
Materiais

Capítulo 3

Ensaaios de Caracterização

Neste capítulo são descritos os procedimentos e métodos utilizados na caracterização do comportamento mecânico dos materiais envolvidos no âmbito deste trabalho. Realizaram-se simulações numéricas em Abaqus™ em poliestireno expandido (EPS) e cortiça micro-aglomerada afim de conseguir um ajuste da curva de comportamento ao modelo adoptado para simular cada material.

3.1 Introdução

Antes de partir para a simulação do impacto do capacete é necessário averiguar, por um lado, se os modelos utilizados para simular o comportamento dos materiais, poliestireno expandido (EPS) e cortiça micro-aglomerada (MA), são adequados e por outro ajustar o mais perfeitamente possível o comportamento do material dentro de cada modelo. Para o efeito, recorreu-se à documentação do programa de simulação Abaqus™ para encontrar o modelo mais adequado para modelar cada material, e posteriormente foram realizados ensaios, no mesmo programa, em condições semelhantes, simulando cada um com o modelo mais adequado, afim de averiguar se o modelo adoptado era ou não fiável, e ajustar todos os parâmetros do modelo para que este representa-se, o mais próximo da realidade, o comportamento mecânico do material.

3.2 Configuração dos ensaios mecânicos

A configuração do ensaio consiste num cilindro de cada material, de dimensões $D_i = 22.8$ mm e $L = 15$ mm, correspondentes aos provetes usados nos ensaios experimentais [61], com uma face apoiada sobre uma parede rígida e a outra apoiada numa parede móvel, como representa a figura 3.1. À parede móvel foi atribuído um deslocamento de $d = 13.5$ mm, correspondente a 90% da deformação do cilindro.

Com este ensaio pretendeu-se ajustar o comportamento de cada material, dentro do modelo utilizado para o modelar, afim de representar o mais fielmente possível o seu comportamento real.

3.2.1 Modelação em Abaqus™

A implementação e configuração dos ensaios de simulação numérica é realizada no programa de simulação Abaqus™. É neste programa que se define a geometria do problema, uma vez que esta é

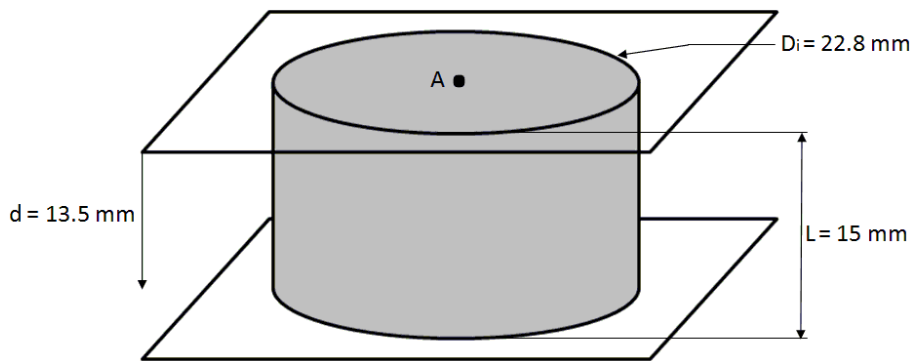


Figura 3.1: Representação esquemática da configuração dos ensaios numéricos realizados para ajuste do comportamento mecânico dos materiais utilizados. Localização do ponto de referência A, utilizado para análise de resultados.

bastante simples, a sua configuração, condições de fronteira e todos os parâmetros de modelação do ensaio numérico.

As paredes da base e do topo são definidas ambas como superfícies rígidas. Assim, a parede da base é encastrada, enquanto que a parede do topo, foi-lhe restringido todos os movimentos, exceptuando ao eixo do sentido do movimento da parede, ao qual lhe foi atribuído uma amplitude correspondente a 90% de deformação do material em estudo. O ponto de referência A é definido no centro da parede móvel e serve como ponto de análise do ensaio, ou seja, é nesse ponto que as forças e deslocamentos são medidos para posterior desenho da curva tensão-deformação do material.

As condições de contacto entre as paredes e o material deformável, foram definidas por contactos do tipo **surface-to-surface*, onde lhe foi atribuído um coeficiente de atrito de 0.1, para o modelar o possível, e previsível, atrito real entre as paredes da maquina de ensaio e os materiais estudados.

O modelo de comportamento do material utilizado foi diferente para o EPS e para a cortiça micro-aglomerada. Apesar de serem ambos tratados como materiais celulares com comportamentos mecânicos parecidos no que diz respeito à forma da curva tensão-deformação, a utilização de modelos diferentes para cada material prende-se com o facto de a cortiça ter um retorno elástico quase total, não apresentando um comportamento plástico definido. Assim, para a modelação do comportamento do EPS, caracterizado por ter um regime elástico-plástico, foi escolhido um modelo **Elastic*, onde foi introduzido o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, que modela a parte elástica do comportamento tensão-deformação do EPS, e um modelo **Crushable Foam*, onde foi introduzido o rácio da tensão de cedência à compressão, o rácio da tensão de cedência hidrostática e a curva tensão-deformação real plástica que modela a parte plástica do comportamento do material. Falaremos mais destes parâmetros mais à frente.

Quanto ao modelo de comportamento da cortiça, que é caracterizada por ser um material com comportamento visco-elástico, foi utilizado um modelo hiperelástico designado por **Hyper Foam*, onde foram introduzidos os valores do coeficiente de Poisson e a curva de comportamento da cortiça em compressão uni-axial. Não foi introduzido qualquer modelo para a modelação do comportamento plástico da cortiça, uma vez que foi assumido que este não apresenta deformações permanentes após ter sido deformada.

Em ambas as modelações do comportamento, quer do EPS quer da cortiça, foi também introduzida a densidade do material.

Para a discretização do corpo deformável em elementos finitos escolheram-se elementos sólidos tetraédricos de quatro nós, com integração total, com três graus de liberdade por nó. A escolha

do elemento tetraédrico deveu-se, por um lado ao seu melhor comportamento perante grandes distorções do elemento finito, quando comparado com os elementos hexaédricos, e por outro, a posterior discretização do *padding* e coroa de protecção usada no capacete modelado, devido à complexidade da sua forma, é feita utilizando elementos finitos tetraédricos. Por este facto, optou-se por realizar os ensaios de caracterização do modelo numérico do material utilizando o mesmo tipo de elemento finito. Na figura 3.2 pode observar-se a representação esquemática e genérica do elemento finito sólido tetraédrico.

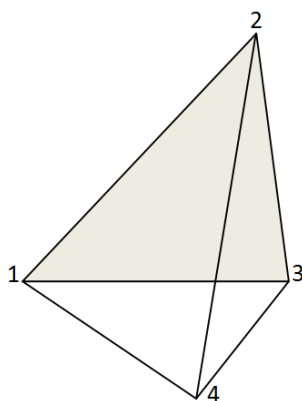


Figura 3.2: Representação esquemática do elemento finito sólido tetraédrico com quatro nós utilizado para a caracterização do comportamento dos materiais.

Com isto, foram realizados ensaios para se verificar se os modelos materiais adoptados eram ou não uma representação realista do comportamento dos materiais em estudo.

3.3 Comportamento mecânico do EPS

A espuma de poliestireno expandido (EPS) é um material de engenharia muito utilizado em aplicações que envolvam absorção de energia. Este material tem vindo a ser utilizado em diversas aplicações distintas, como por exemplo isolamento térmico, de vibrações, baixa absorção de humidade e baixo peso específico (cerca de 97% do seu volume é ar). Devido ao seu baixo peso, custo reduzido e capacidade de absorção de choque, o EPS é o material mais usado como absorvedor de energia de impacto em capacetes rodoviários. Para além disso, é um material de fácil produção e em formas bastante complexas. Este é produzido através de esferas sólidas de poliestireno, que são colocadas no molde com a forma que se pretende obter, e injectado pequenas quantidades de gás. Com a expansão do gás, devido ao calor, este forma células fechadas perfeitas, com o gás no seu interior, que podem atingir cerca de 40 vezes o volume das esferas originais.

A figura 3.3 apresenta algumas amostras de folhas de poliestireno expandido.

Com base na resposta do material após impacto, à temperatura de 20°C, as espumas poliméricas são designadas por rígidas, se o comportamento for elasto-plástico, ou flexíveis, se for elástico. As espumas de poliestireno expandido utilizadas no âmbito deste trabalho são espumas com as características das mesmas utilizadas por Mills *et al.* [97], no estudo de impacto oblíquo em capacetes de mota. As propriedades destas espumas são dadas na tabela 3.1, e o seu comportamento mecânico pode ser definido analiticamente, por partes, de acordo com a seguinte formulação:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{para } \varepsilon \in [0, \varepsilon_y] \\ \sigma_{c0} + \frac{P_0\varepsilon}{1-\varepsilon-R} & \text{para } \varepsilon \in [\varepsilon_y, \varepsilon_l] \end{cases} \quad (3.1)$$



Figura 3.3: Exemplos de folhas de Poliestireno expandido (EPS).

Neste modelo E é o módulo de elasticidade da espuma de poliestireno expandido, ε_y é a deformação nominal para a tensão de cedência ($\pm 5\%$) e o σ_{c0} é a tensão de cedência à compressão do material, ε_l é a deformação nominal máxima à compressão, que depende da densidade do material, P_0 é a pressão efectiva de gás dentro das células e R é a densidade relativa da espuma (densidade da espuma dividida pela densidade do polímero sólido¹).

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas das espumas de EPS utilizadas na sua caracterização [97].

Material	ρ [kg/m ³]	E [Mpa]	ν	tensão de cedência σ_{c0} [MPa]	Pressão de gás efectiva P_0 [MPa]
EPS coroa	22	3.0	0.1	0.14	0.097
EPS <i>padding</i>	59	19	0.1	0.62	0.19

Assim, para a modelação deste material no programa de simulação Abaqus™ foi necessária um modelo que simulasse a parte elástica, e outro que simulasse a parte plástica do seu comportamento. Assim, como já foi dito anteriormente, para simular a parte elástica, foi escolhido um modelo do tipo *Elastic, onde foi introduzido o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Para simular a parte plástica do comportamento, foi escolhido um modelo de plasticidade do tipo *Crushable foam, onde foram introduzidos uma curva de comportamento tensão-deformação plástica do material à compressão, seguido dos rácios σ_{c0}/p_{c0} e p_t/p_{c0} , onde p_{c0} e p_t representam a tensão de cedência hidroestática à compressão e à tracção respectivamente. Os valores utilizados, de acordo com Mills [97], foram $\sigma_{c0}/p_{c0} = 1.933$ e $p_t/p_{c0} = 1.0$. A curva tensão-deformação plástica utilizada foi calculada a partir da equação 3.1, usando os parâmetros da tabela 3.1, para intervalos de deformação real à compressão de 0.06. A deformação real à compressão é definida por:

$$\varepsilon_r = -\ln(1 - \varepsilon_n) \quad (3.2)$$

¹Densidade do poliestireno sólido é $\rho = 1050 \text{ kgm}^{-1}$.

3.4 Comportamento mecânico da cortiça micro-aglomerada

Como já foi referido anteriormente, a cortiça é um material celular bastante complexo e cujas propriedades, em termos de impacto ainda são pouco exploradas merecendo por isso estudos mais detalhados. Assim, a cortiça reúne um conjunto de propriedades notáveis das quais se destacam a estabilidade química e resiliência, impermeabilidade a gases e líquidos, baixa densidade e resistência ao fogo e ao desgaste. Para além disso, é um material natural, ecológico, higiénico, de fácil manutenção e durabilidade. Por todas estas características, a cortiça é hoje em dia como material de isolamento térmico, acústico, absorção de vibrações e de energia em pavimentos, vedantes, calçado, embalagens e muitos outros. Neste sentido, é cada vez mais frequente os estudos acerca da aplicação deste material como alternativa em aplicações de segurança passiva [96]. A figura 3.4 mostra uma amostra de folhas de cortiça.



Figura 3.4: Alguns exemplos de folhas de cortiça micro-aglomerada.

No âmbito deste trabalho, foi utilizado o mesmo aglomerado composto de cortiça utilizado por Gameiro [61], segundo o qual tratar-se do micro-aglomerado mais fácil de encontrar no mercado, sendo constituído por partículas de cortiça e um adesivo. Este é produzido com grânulos de melhor qualidade, que resultam da trituração de sub-produtos da produção de rolhas e discos naturais e refugo de cortiça amadia.

A escolha da cortiça micro-aglomerada em detrimento da natural deve-se ao facto de esta permitir a obtenção de propriedades mais homogêneas e poder ser fabricada industrialmente com dimensões e geometrias muito mais variadas do que a cortiça natural.

A cortiça-aglomerada é constituída por partículas de cortiça de dimensões variáveis (0.5 a 2 mm) misturadas em parafina, látex, óleo parafínico e cola à base de poliuretano (resina sintética termoplástica). O fabrico deste micro-aglomerado é feito através da envolvência do granulado de cortiça com o adesivo misturado com solvente ou plastificante, com o auxílio de um pulverizador de aspersão. A velocidade de rotação da mistura é controlada de forma a minimizar a fricção entre os grânulos de cortiça. Esta mistura é posteriormente enviada por pistões para a câmara de aquecimento, onde se dá a cura do adesivo, para posterior extrusão de forma a produzir rolhas de micro-aglomerado composto.

As características e propriedades mecânicas do micro-aglomerado estão representadas na tabela 3.2 e o gráfico do comportamento tensão-deformação na figura 3.5 [61].

A forma da curva caracteriza-se por um parte inicial elástica, que se deve principalmente à resistência à flexão das paredes celulares. Segue-se um patamar quase-horizontal caracterizado

Tabela 3.2: Propriedades mecânicas da cortiça micro-aglomerada utilizadas na caracterização dos materiais [61].

Propriedades mecânicas	ρ [kg/m ³]	E [Mpa]	σ_y [Mpa]	ν
Material Expandido	293	15	-	-
Material Denso	-	9000	1	0.325

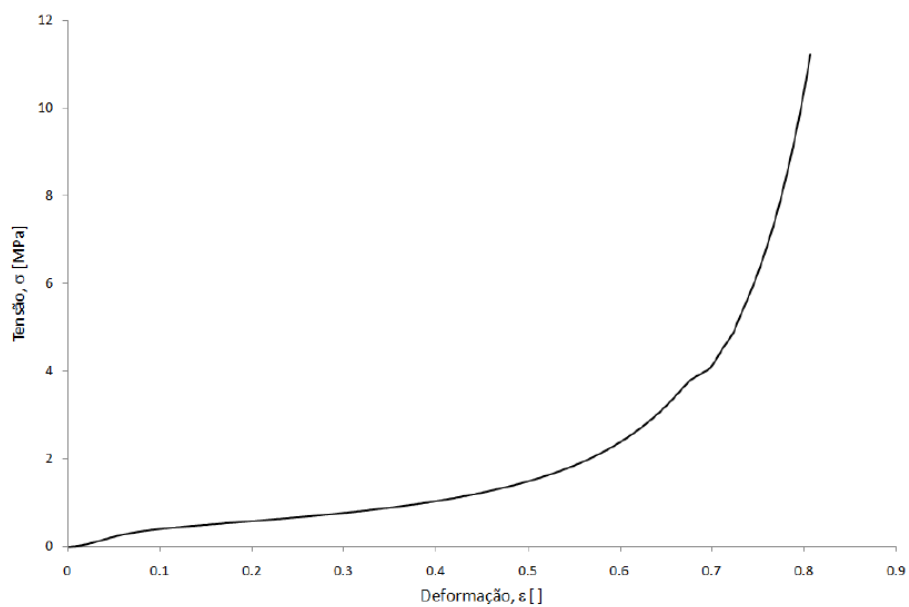


Figura 3.5: Curva de comportamento à compressão da cortiça micro-aglomerada [61].

pelo esmagamento² progressivo das paredes celulares, que se dá para valores de tensão $0.5 \leq \sigma \leq 1$ [MPa]. Este patamar não é perfeitamente horizontal, a tensão aumenta ligeiramente durante a propagação da onda de colapso na cortiça devido à heterogeneidade da estrutura, formando uma "barreira" que é necessário vencer. No caso da cortiça aglomerada este aumento de tensão é ainda mais evidente, que se deve, provavelmente ao facto desta estrutura, constituída por grânulos individuais aglomerados com aditivo, ser diferente da estrutura que caracteriza a cortiça natural. Por fim, a curva de comportamento sobre um aumento acentuado de tensão, que corresponde ao momento em que há o colapso total das células, e as paredes celulares entram em contacto umas com as outras. Este facto ocorre para valores de deformação de $\varepsilon \approx 70\%$.

Assim, a forma da curva de comportamento $\sigma - \varepsilon$, e principalmente a existência de um patamar de tensão que se estende para valores de deformação elevados, $\varepsilon \approx 70\%$, sugere que a energia absorvida por unidade de volume pode atingir valores bastante elevados. É este facto, aliado ao facto do retorno elástico quase total da cortiça, que justifica que se tenha pensado em utilizar cortiça em aplicações que envolvam absorção de energia, mais concretamente no âmbito deste trabalho.

No âmbito desta caracterização, realizaram-se ensaios numéricos sobre um cilindro de cortiça micro-aglomerada, afim de se verificar se o modelo escolhido para a caracterização do seu comportamento era ou não adequado. Como já foi referido, o modelo escolhido foi o *Hyper Foam, pois, de acordo com a documentação do programa de simulação escolhido, é o modelo que melhor se adequa ao comportamento visco-elástico da cortiça. Assim, os parâmetros que são precisos definir neste modelo são o coeficiente de Poisson e a curva de compressão uniaxial da cortiça. Como se pode ver na tabela 3.2, o coeficiente de Poisson fora da zona de densificação é nulo, passando a 0.3 nessa zona. Como o modelo de comportamento da cortiça escolhido para a modelar não permite a definição de dois coeficientes de Poisson, é necessário ajustar esse parâmetro para melhor modelar o comportamento da cortiça.

3.5 Resultados e conclusões

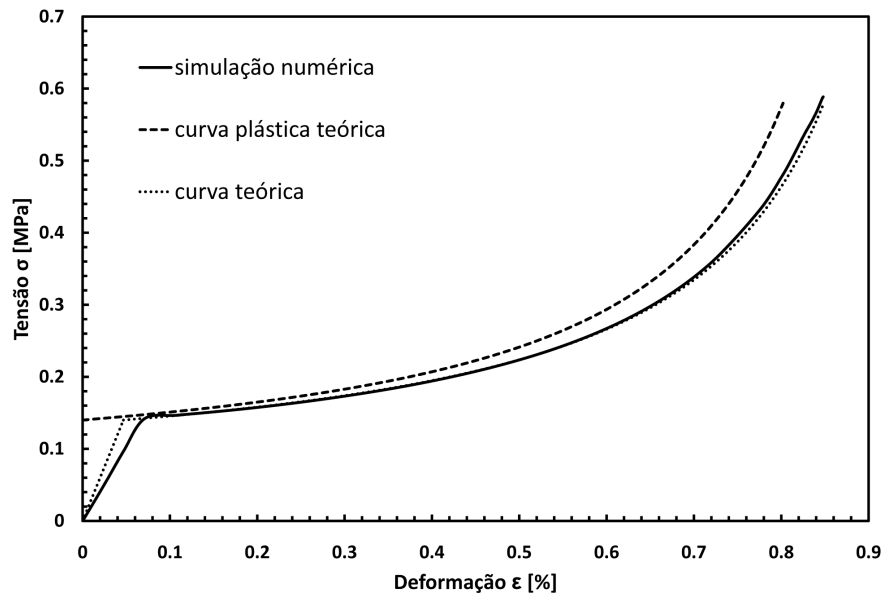
Nesta secção apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados no âmbito deste trabalho. No caso do comportamento mecânico do EPS, é feita a comparação entre o comportamento teórico à compressão uniaxial com os ensaios numéricos realizados, afim de determinar se o modelo escolhido é ou não adequado para modelação do seu comportamento mecânico. No que diz respeito ao comportamento da cortiça-aglomerada, a comparação dos resultados numéricos é feito com a curva de comportamento real à compressão.

3.5.1 Poliestireno expandido

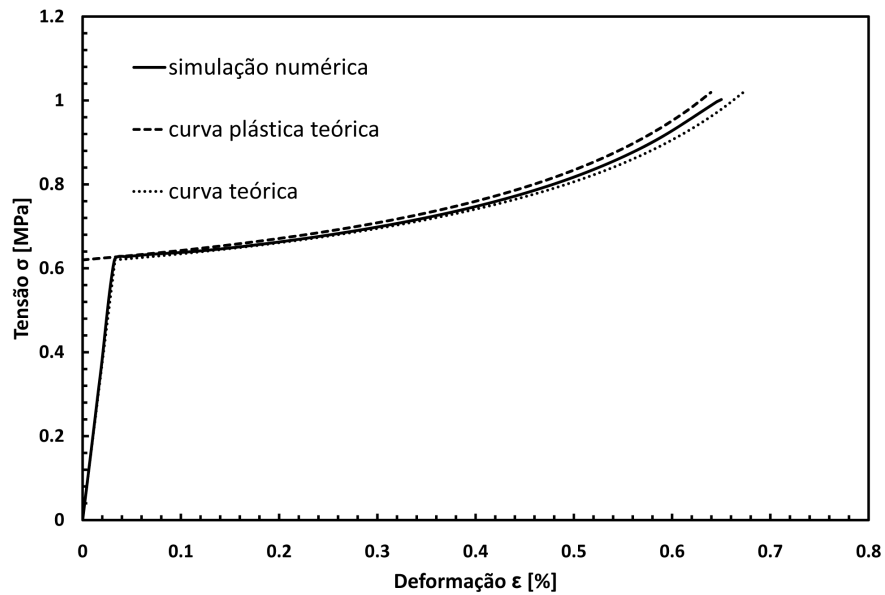
No gráfico da figura 3.6 apresentam-se as curvas tensão-deformação numéricas de compressão obtidas a partir dos ensaios numéricos realizados para as duas densidades de EPS usadas neste trabalho.

De acordo com os resultados obtidos é possível concluir que o modelo de comportamento utilizado para modelar o EPS modela correctamente este tipo de material. Neste sentido, podemos verificar que, no caso do EPS de densidade $\rho = 22$ [kg/m³] a curva apresenta um comportamento elástico até cerca de 0.04% da sua deformação, ligeiramente afastado do comportamento real que ocorre até valores de 0.09% da deformação. Seguidamente o material entra na sua zona plástica, onde os resultados obtidos experimentalmente estão perfeitamente de acordo com os valores introduzidos para o comportamento do material. No caso do EPS de densidade $\rho = 59$ [kg/m³], tanto a zona caracterizada por ter um comportamento elástico, como a zona onde o material

²Do inglês: *crushing*.



(a)



(b)

Figura 3.6: (a) - Curvas tensão-deformação do EPS de densidade $\rho = 22 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. (b) - Curvas tensão-deformação do EPS de densidade $\rho = 59 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

tem um comportamento plástico é perfeitamente modelado pelo modelo numérico elásto-plástico escolhido. Por outro lado, o modelo numérico de comportamento adoptado para modelar o EPS, o *Crushable Foam, pressupõe que, uma vez atingida a tensão de cedência o material entra na sua zona plástica, atingindo uma deformação permanente. Este comportamento é idêntico ao comportamento real do EPS, podendo concluir-se que o modelo numérico reproduz o seu comportamento real.

Com tudo isto, pode concluir-se que o modelo escolhido modela adequadamente o comportamento real do EPS.

3.5.2 Cortiça micro-aglomerada

A figura 3.7 apresenta os resultados obtidos na escolha do coeficiente de Poisson para modelar adequadamente a cortiça micro-aglomerada através do modelo material escolhido.

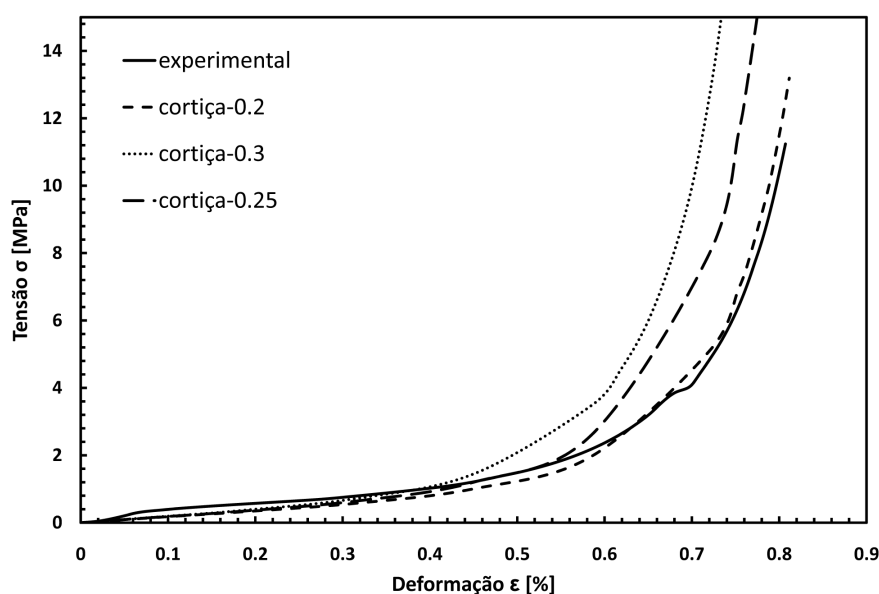


Figura 3.7: Caracterização do comportamento da cortiça micro-aglomerada para diferentes valores de Coeficiente de Poisson.

De acordo com os resultados obtidos, é possível verificar que existem diferenças entre o comportamento real da cortiça micro-aglomerada e o comportamento numérico da mesma, simulado com o modelo escolhido. Como já foi dito anteriormente, a curva de compressão da cortiça pode ser dividida em três zonas: (a) zona elástica, (b) zona de patamar e (c) zona de densificação. Como se pode ver na figura 3.7, esta divisão não é acentuada, dado que a zona elástica e de patamar se confundem as duas. Contudo, a zona de densificação ocorre para valores de deformação e de tensão idênticos.

Tendo em conta as diferenças entre o comportamento real e numérico da cortiça em estudo, o valor de coeficiente de Poisson que melhor modela o comportamento da curva é de 0.2.

É de salientar o facto de, para a modelação do comportamento numérico da cortiça micro-aglomerada é usado um modelo de comportamento hiperelástico, o que significa que, após retirada a carga, o material recupera quase totalmente a sua forma inicial. Assim, pode-se concluir que o modelo adoptado consegue reproduzir o retorno elástico real da cortiça.

Em conclusão, embora existam algumas diferenças entre as curvas obtidas quando comparadas com a curva real, modelo adoptado é bastante razoável, e modela correctamente o comportamento da cortiça.

Parte III

Modelação Numérica

Capítulo 4

Procedimentos e métodos

Neste capítulo expõem-se os princípios básicos da formulação do Método dos Elementos Finitos (MEF) aplicada à mecânica dos meios contínuos e descreve-se brevemente o programa Abaqus™, utilizado para a realização das simulações numéricas. Faz-se a descrição da metodologia usada para a construção do modelo em superfícies e posterior discretização. Descrevem-se os ensaios numéricos realizados para as diferentes configurações de impacto, de acordo com a norma ECE-R.22, com um capacete utilizando *padding* e coroa em EPS e cortiça.

4.1 Método dos Elementos Finitos

O recurso a métodos numéricos e computacionais, dada a sua rapidez e baixo custo, é hoje em dia, essencial para a realização de qualquer investigação ou desenvolvimento tecnológico. Deste modo a indústria, como a aeroespacial e a indústria automóvel, onde os testes experimentais são muito dispendiosos, efectuam ensaios numéricos afim de averiguarem se é viável ou não avançarem para os testes experimentais. Assim, o Método dos Elementos Finitos tem vindo, ao longo do tempo, a mostrar-se como um método essencial para qualquer investigação científica.

A base para o Método dos Elementos Finitos foi dada, em finais do século XVIII pelo matemático Gauss, que pela primeira vez, propôs a utilização de funções de aproximação para a resolução de problemas matemáticos. Mas apenas com o aparecimento do computador digital, no século XX, é que este método de análise teve uma evolução significativa. Assim, a publicação mais antiga onde se emprega a palavra "elementos finitos" data de 1960, pelo professor, da Universidade de Berkly, Ray Clough.

Assim, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico que pode ser usado para se obter soluções para uma abrangente variedade de problemas de engenharia envolvendo análise de tensões, transferência de calor, eletromagnetismo, comportamento de fluidos, etc. Em geral, problemas de engenharia são modelos matemáticos de situações físicas. Modelos matemáticos são equações diferenciais com condições de contorno e parâmetros iniciais definidos. Essas equações diferenciais são resultado da aplicação de Leis fundamentais ou Princípios da Natureza para sistemas ou volumes de controle e, dessa forma, representam um balanço de massa, força e energia da estrutura em estudo. Em linhas gerais, pode-se definir o MEF como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as

propriedades de quem os originou. Esses elementos (elementos finitos) são descritos por equações diferenciais e com as quais se torna possível prever o comportamento do meio contínuo.

Assim, a abordagem ao MEF inicia-se pela definição geométrica da estrutura em estudo, recorrendo a programas CAD¹. De seguida, procede-se à discretização da estrutura em Elementos Finitos, figura 4.1, usando para isso programas específicos de pré-processamento. Essa discretização, que pode ser feita em elementos que podem assumir diversas formas, como tetraédricos ou hexaédricos, "divide" a estrutura em estudo em vários elementos mais simples aos quais vão ser aplicadas leis da física e determinar o comportamento da estrutura.

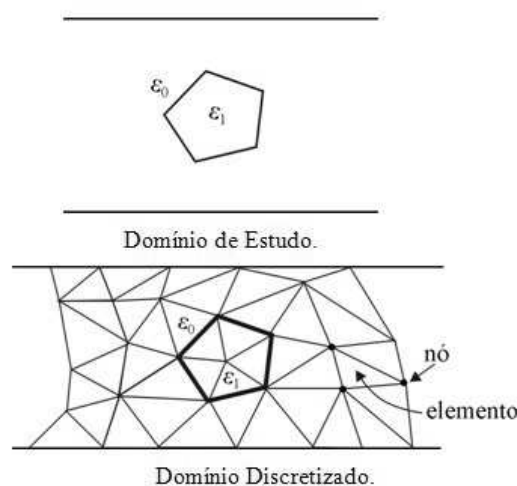


Figura 4.1: Modelo composto por dois materiais, antes e depois da discretização.

A discretização da região deve respeitar a fronteira entre os materiais e um nó deve ser o vértice de um ou mais elementos, não podendo ser um ponto situado no meio de uma aresta. O deslocamento destes nós, corresponde aos graus de liberdade do sistema. De seguida, atribuem-se as propriedades físicas e mecânicas de cada componente do modelo. Esta atribuição deve ser feita de uma forma cuidada, pois são determinantes para que o modelo numérico corresponda ou não à realidade. A definição dos modelos de materiais a ser utilizados é muito importante para que se consiga obter resultados razoáveis. Existem vários modelos de materiais, e o seu emprego deve ser minucioso, pois caso contrário os resultados podem não ser fiáveis. Assim, na área do cálculo estrutural, os modelos de materiais, também designados por modelos constitutivos, podem ser de diversas formas:

- Elástico (linear), em que, no fim da aplicação das cargas, o material retoma à sua forma inicial, sem qualquer deformação;
- Plástico (não-linear), em que o material assume uma deformação permanente;
- Elástico-plástico, em que o material é caracterizado por uma zona inicial em que se comporta como um material elástico e por outra zona em que se comporta como material plástico;
- Hiperelástico, onde não existe comportamento plástico e é independente da temperatura;
- Viscoelástico e viscoplástico, onde o comportamento do material é dependente do tempo/velocidade;
- *Etc.*

¹Do inglês *Computer Aided Design* - Desenho Assistido por Computador.

A definição do modelo constitutivo não passa só pela escolha o comportamento do material. Para além disso, é necessário definir as relações matemáticas do comportamento e determinar as propriedades físicas e mecânicas do material (definidas por cada modelo), como por exemplo o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

De seguida, são definidas as condições fronteira (apoios e condições de contorno) e a aplicação de cargas. Só depois se procede à fase de cálculo e pos-processamento.

A análise de resultados é muito importante, pois sendo o Método dos Elementos Finitos um método de cálculo numérico (aproximado), existe sempre alguma acumulação de erros, que pode ser devido a diversos factores, como má definição/interpretação do problema, utilização de programas menos adequados, geração de malha, etc.

4.2 Programa de simulação Abaqus™

O programa de simulação adoptado para a realização deste trabalho é o Abaqus™. Este, é um programa bastante versátil que possibilita a sua utilização em diversas áreas da engenharia, como é o caso do sector automóvel e aeroespacial, em investigações académicas e de desenvolvimento tecnológico.

A palavra abaqus deriva da palavra grega Aba-kala-culus, que significa a memória da solução. Este pacote de programa comercial de análise pelo método dos elementos finitos, comercializado actualmente pela SIMULIA, uma marca da *Dassault Systemes SA*, é dividido em dois grandes módulos: o módulo gráfico e o módulo de análise. O módulo gráfico é constituído por um módulo de pré-processamento CAE² (Abaqus/CAE), onde o utilizador define, por meio de uma *interface* gráfica, o ficheiro de entrada (ASCII) e um módulo de pós-processamento (Abaqus/Viewer) onde o utilizador pode obter uma representação gráfica dos resultados da análise. O módulo de análise é constituído por dois módulos principais, o Abaqus/Standard e o Abaqus/Explicit.

É através do Abaqus/CAE que o utilizador define as características do problema que pretende analisar. Assim, o utilizador define a geometria da estrutura, atribui as características materiais, aplica as cargas e condições fronteira do problema bem como as interacções/atrito entre os vários componentes em análise, define o número de etapas para a realização da análise e a sua natureza (linear ou não-linear) e faz a discretização em elementos finitos da estrutura. Em resumo, é neste módulo que o utilizador define todo o problema em análise que constitui o ficheiro de entrada. Este ficheiro, por ser do tipo ASCII, pode ser manipulado para situações não tratadas no Abaqus/CAE.

A análise do problema pelo método dos elementos finitos pode ser feito dependente da análise pretendida. Assim, para uma análise através do esquema tradicional de integração implícita, utilizamos o módulo de análise Abaqus/Standard. Para a resolução de problemas não-lineares dinâmicos e *quasi*-estáticos, que utilizam um esquema de integração explícita, utilizamos o módulo de análise Abaqus/Explicit.

Por fim, o módulo de pós-processamento Abaqus/Viewer, que opera sobre os ficheiros de saída, o utilizador visualiza e interpreta os resultados numéricos obtidos.

Com isto, graças às suas grandes potencialidades, o Abaqus™ permite o estudo numérico de quase todos os tipos de problemas, envolvendo geometrias complexas, interacções entre diversos materiais, grandes deformações, etc.

4.3 Modelação do ensaio

Neste trabalho estuda-se a viabilidade da substituição do tradicional *padding* de absorção de energia, feito de EPS, por um *padding* em cortiça micro-aglomerada, em capacetes rodoviários.

²Do inglês *Computer Aided Engineering* - Engenharia Assistida por Computador.

De modo a verificar a fiabilidade de aplicação desse *padding* como material absorvedor de energia, foram realizadas simulações numéricas, pelo método dos elementos finitos recorrendo ao programa de simulação Abaqus™. A configuração dos ensaios numéricos é desenvolvida de maneira a aproximar todos os parâmetros à norma Europeia ECE-R.22/05, no que diz respeito à realização de testes de queda, para as diferentes configurações de impacto (Ponto B, P, X e R - ver figura 4.2) e sobre uma plataforma de impacto plana.

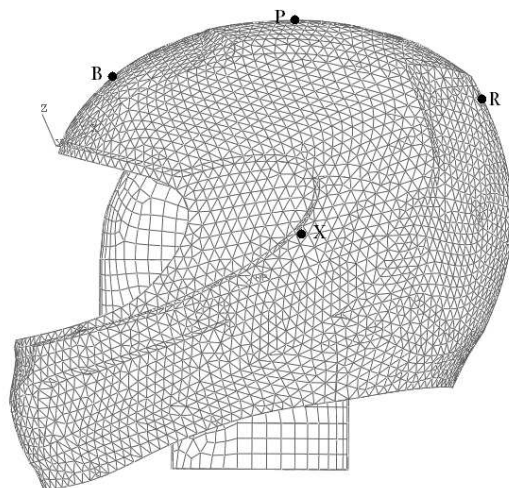


Figura 4.2: Pontos de impacto nas simulações numéricas realizadas.

Com isto, um modelo de cabeça equipado com um capacete, é enviado contra uma plataforma plana rígida de acordo com a norma ECE-R.22.

Assim, estuda-se e compara-se o desempenho do capacete, no que diz respeito à aceleração máxima do centro de massa do modelo da cabeça e valores de HIC, parâmetros indispensáveis para atribuição da homologação por parte da norma Europeia, quando o *padding* de absorção de energia é constituído por EPS ou por cortiça micro-aglomerada.

4.3.1 Modelação 3D

Antes de se partir para o desenvolvimentos do modelo e análise em Elementos Finitos do capacete, foi necessário modelar, apropriadamente, cada componente do capacete. O programa Abaqus™, como já foi referido no capítulo anterior, embora possua uma interface gráfica que permite o desenho de estruturas simples, no caso de estruturas mais complexas é necessário recorrer a programas de modelação CAD mais dedicados, e posteriormente importar o modelo para o Abaqus™.

Assim, a modelação de todos os componentes presentes na análise foi desenvolvida através do programa de modelação CAD, desenvolvido pela *Dassaut Systemes SA*, CATIA V5.

O modelo do capacete em estudo é constituído por três partes: o casco, o *padding* e a coroa de absorção de energia (*padding* de menores dimensões que encaixa dentro do *padding* principal). Neste estudo não foi desenvolvido o *padding* de conforto nem o sistema de retenção do queixo, uma vez que o principal objectivo é o estudo comparativo do desempenho do *padding* de absorção de energia.

O capacete em estudo foi o NEXX XR1, desenvolvido pela empresa NEXX PRO - fabrica de capacetes lda. Este capacete, ilustrado na figura 4.3, cumpre todos os requisitos impostos pela norma europeia, utilizando um *padding* de absorção de energia de dupla densidade (formado por duas partes diferentes - *padding* e coroa), e encontra-se no mercado.



Figura 4.3: Capacete real usado para a realização do modelo 3D.

Para além dos constituintes do capacete, foi necessário ainda a modelação de um modelo da cabeça, desenvolvida de acordo com o tamanho do capacete, e em conformidade com a norma adoptada.

Modelo do casco

Para a modelação 3D do casco, foi necessário o levantamento de forma do mesmo (nuvem de pontos), e através do programa CAD, CATIA V5 foi desenvolvida a modelação por superfícies.

A nuvem de pontos e o modelo final em superfícies são apresentados na figura 4.4.

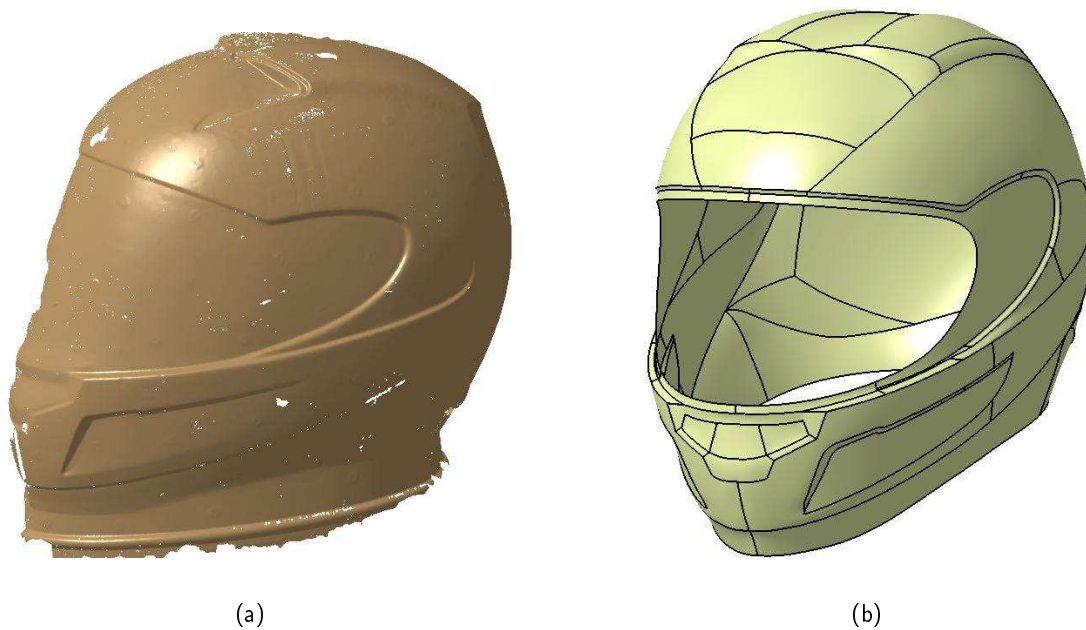


Figura 4.4: (a) - Nuvem de pontos do casco do capacete fornecida pela NEXX. (b) - Modelo final em superfícies do casco.

Modelo do *padding* de protecção

O *padding* de protecção é em conjunto com a coroa de protecção, o componente mais importante neste trabalho. Neste caso, partiu-se de um modelo inicial em superfícies do *padding* de protecção, sendo que foi necessário uma melhoria da estrutura para que a sua importação e manipulação no programa de simulação fosse bem sucedida.

O modelo inicial e final do *padding* de protecção estão representados na figura 4.5.

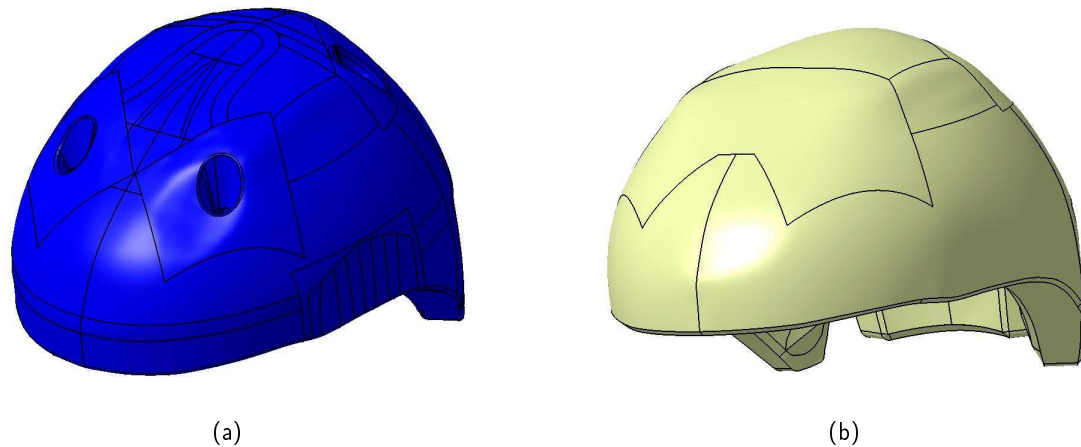


Figura 4.5: (a) - Modelo em superfícies do *padding* de protecção fornecida pela NEXX. (b) - Modelo final em superfícies do *padding* de protecção.

Modelo da coroa de protecção

A coroa de protecção, no caso do capacete em estudo, é constituída por um EPS de mais baixa densidade, e é inserida dentro do *padding* de protecção.

O modelo em superfícies da coroa de protecção desenvolvida é apresentado na figura 4.6.

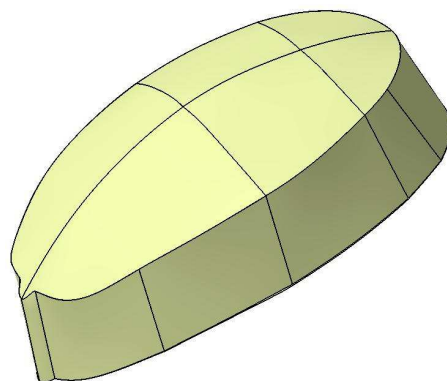


Figura 4.6: Modelo em superfícies desenvolvido da coroa de protecção.

Modelo da Cabeça

De acordo com as especificações do fabricante, o capacete em estudo abrange os tamanhos de cabeça entre 540 mm e 600 mm de circunferência. De acordo com a norma ECE-R.22, os tamanhos do modelo da cabeça para essa gama vão desde o tamanho C ao tamanho M. Assim,

para a realização deste trabalho escolheu-se modelar a cabeça de tamanho J, correspondente a um tamanho médio da cabeça, cuja circunferência é de 570 mm.

O modelo em superfícies da cabeça é apresentado na figura 4.7 e as suas características estão apresentadas na tabela 4.1.

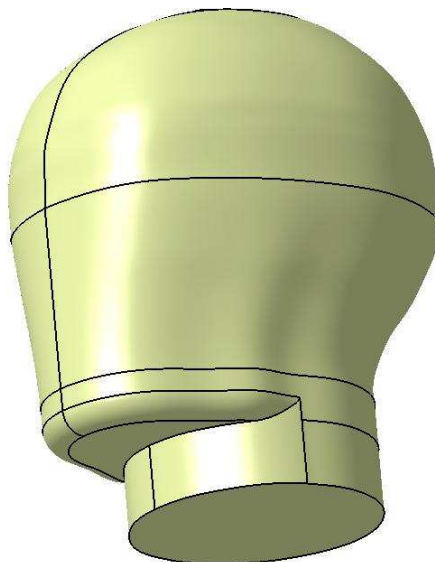


Figura 4.7: Modelo em superfícies da cabeça, tamanho J, desenvolvido de acordo com as especificações da norma ECE-R.22.

Tabela 4.1: Propriedades do modelo da cabeça desenvolvido (tamanho J).

Massa [kg]	I_{xx} [kgcm ²]	I_{yy} [kgcm ²]	I_{zz} [kgcm ²]
4.7	200	260	180

4.4 Modelação em Abaqus™

Após a modelação 3D de todos os componentes presentes na análise, estes foram importados para o programa de pré-processamento e de análise pelo método dos Elementos Finitos, Abaqus™.

4.4.1 Modelo de elementos finitos do casco

A modelação numérica do casco em elementos finitos, ao qual lhe foi atribuída uma espessura de $t = 1.5$ mm, foi feita através de elementos casca deformáveis S3R de três nós e com 5 pontos de integração. Dada a sua geometria complexa, a malha aplicada é não-estruturada e com elementos de dimensão característica $l = 7$ mm. Na figura 4.8 está representada a malha de elementos finitos utilizada na discretização do casco.

O material constituinte do casco, tal como foi feito por Van den Bosh [9], é o acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Este é um termoplástico duro e muito resistente ao calor e ao impacto, caracterizado por ter um comportamento elásto-plástico. Neste trabalho prático apenas foi utilizado, tal como o referido autor, o ABS como material linear elástico, não considerando o seu comportamento plástico. Assim o modelo de comportamento atribuído é do tipo *El stic, e as características atribuídas para a sua modelação são apresentadas na tabela 4.2.

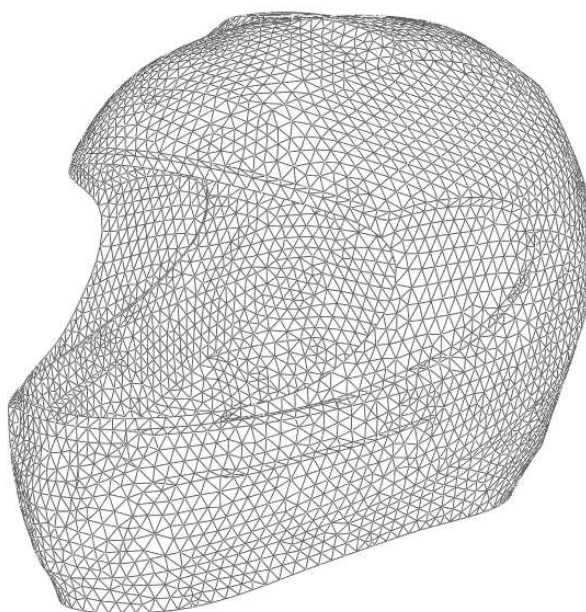


Figura 4.8: Modelo em elementos finitos do casco.

Tabela 4.2: Propriedades do ABS [9].

Densidade [kg/m^3]	Módulo de Elasticidade [MPa]	Coefficiente de Poisson
2080	8540	0.325

4.4.2 Modelo de elementos finitos do *padding* e da coroa de protecção

Na modelação do *padding* e da coroa em elementos finitos, são utilizados elementos sólidos deformáveis tetraédricos não-estruturados de quatro nós, C3D4, de dimensão característica média $l = 7$ mm. O modelo do comportamento do material atribuído, como já foi dito no capítulo 3.1, é, no caso do EPS um modelo *Elastic mais *Crushable Foam, para modelar a parte elástica e plástica respectivamente, da curva tensão-deformação à compressão, e no caso da cortiça micro-aglomerada, o modelo utilizado foi o *Hyperfoam.

A malha de elementos finitos do *padding* e da coroa são apresentadas na figura 4.9.

4.4.3 Modelo em elementos finitos do modelo da cabeça

Neste trabalho, a cabeça é considerada rígida, e como tal a sua discretização em elementos finitos do modelo da cabeça é feita através de elementos casca rígidos de quatro nós, R3D4 (figura 4.10).

Na tabela 4.3 indicam-se as características das malhas de elementos finitos atribuídas a todos os componentes utilizados na construção do modelo utilizado nas simulações numéricas de impacto frontal contra uma plataforma plana.

4.4.4 Definição de contactos e condições de impacto

Contactos

É essencial, e de extrema importância, a definição da forma como cada componente envolvido na simulação interage quando em contacto com outros componentes. Para tal, existem vários

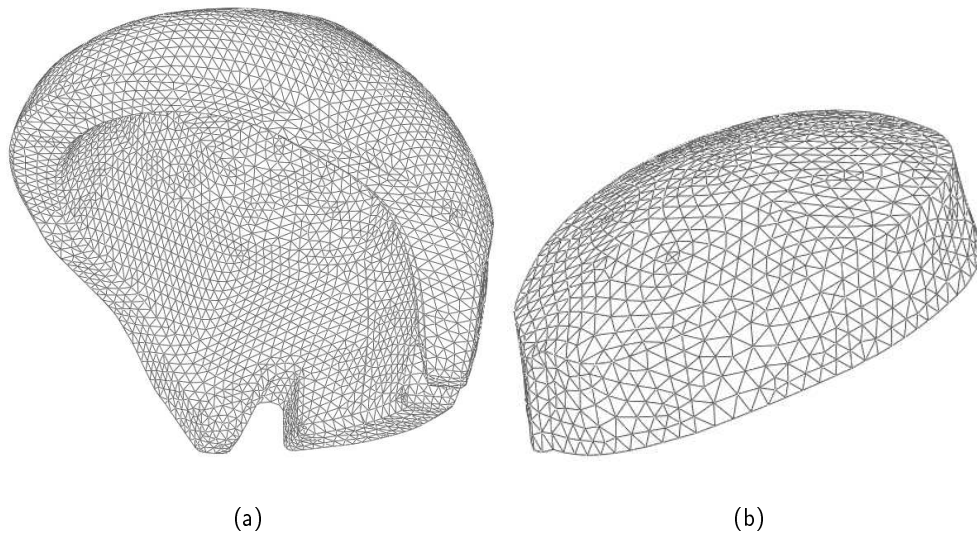


Figura 4.9: Modelo em elementos finitos do *padding* (a) e da coroa (b) de protecção.

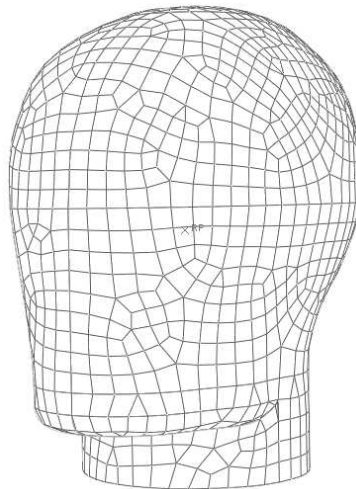


Figura 4.10: Modelo em elementos finitos do modelo da cabeça (tamanho J)

Tabela 4.3: Características das malhas de elementos finitos atribuídas aos componentes do modelo global utilizado nas simulações numéricas de impacto frontal realizadas no âmbito deste trabalho.

	tipo de elemento		l [mm]	nº de elementos	nº de nós
<i>padding</i>	sólido deformável	- CD34	7	63870	13274
coroa	sólido deformável	- CD34	7	12198	2629
casco	casca deformável	- S3R	7	9270	4740
cabeça	casca rígido	- S4R	10	1697	1663
plataforma	casca rígido	- S4R	150	1	4

modelos para a definir as interacções entre os diversos componentes, disponíveis no programa Abaqus™.

No caso de estudo deste trabalho, é imediata a identificação dos componentes que interagem entre si. As interacções que são necessárias definir são:

- Cabeça - *padding* de protecção;
- Cabeça - coroa de protecção;
- *Padding* - coroa;
- *Padding* - casco;
- Casco - plataforma de impacto.

Assim, para definir a interacção entre todos os componentes é utilizado um modelo do tipo **General Contact (Explicit)*, ao qual lhe foi atribuído uma propriedade de atrito igual a 0.5. O modelo utilizado tem dois propósitos: evitar a interpenetração entre os diversos componentes, e simular o atrito entre o *padding* e o casco, evitando o escorregamento do *padding* para fora do casco (pois na realidade estes dois componentes não se encontram ligados de qualquer outra forma), e simular o atrito existente entre a plataforma de impacto e o casco. Para além disso, foi criada uma restrição do tipo **Tie* entre o *padding* e a coroa de protecção. Isto pretende definir a colagem entre os dois componentes, já que na realidade estes dois componentes são colados.

Condições fronteira e de impacto

De acordo com a norma utilizada na realização deste trabalho, norma ECE-R.22, o modelo (capacete + modelo da cabeça) é lançado contra uma plataforma fixa a uma velocidade $v_{\text{impacto}} = 7.5 \text{ m/s}$, sendo que nenhum movimento do modelo é restrito.

Assim, a plataforma de impacto é encastrada, restringindo deste modo todos os seus movimentos, e é dada ao modelo uma velocidade de impacto, $v_{\text{impacto}} = 7.5 \text{ m/s}$, batendo livremente (sem movimentos restringidos) contra a plataforma. A figura 4.11 ilustra os diferentes impactos realizados (ponto B, P, R e X):

É então realizada uma análise do impacto através do *Abaqus dynamic (explicit)*, para um impacto de duração $t = 20 \text{ ms}$.

A avaliação do desempenho do capacete é feito pela norma ECE-R.22, através da avaliação da aceleração máxima do centro de gravidade da cabeça, e do HIC. Assim, durante o impacto é medida a aceleração do ponto de referencia do modelo da cabeça, correspondente ao centro de gravidade da cabeça, e através desses resultados retiramos a aceleração máxima e calculamos o HIC correspondente. Com base nestes dois parâmetros, os dois modelos, com *padding* e coroa em EPS e com *padding* e coroa em cortiça micro-aglomerada, são comparados.

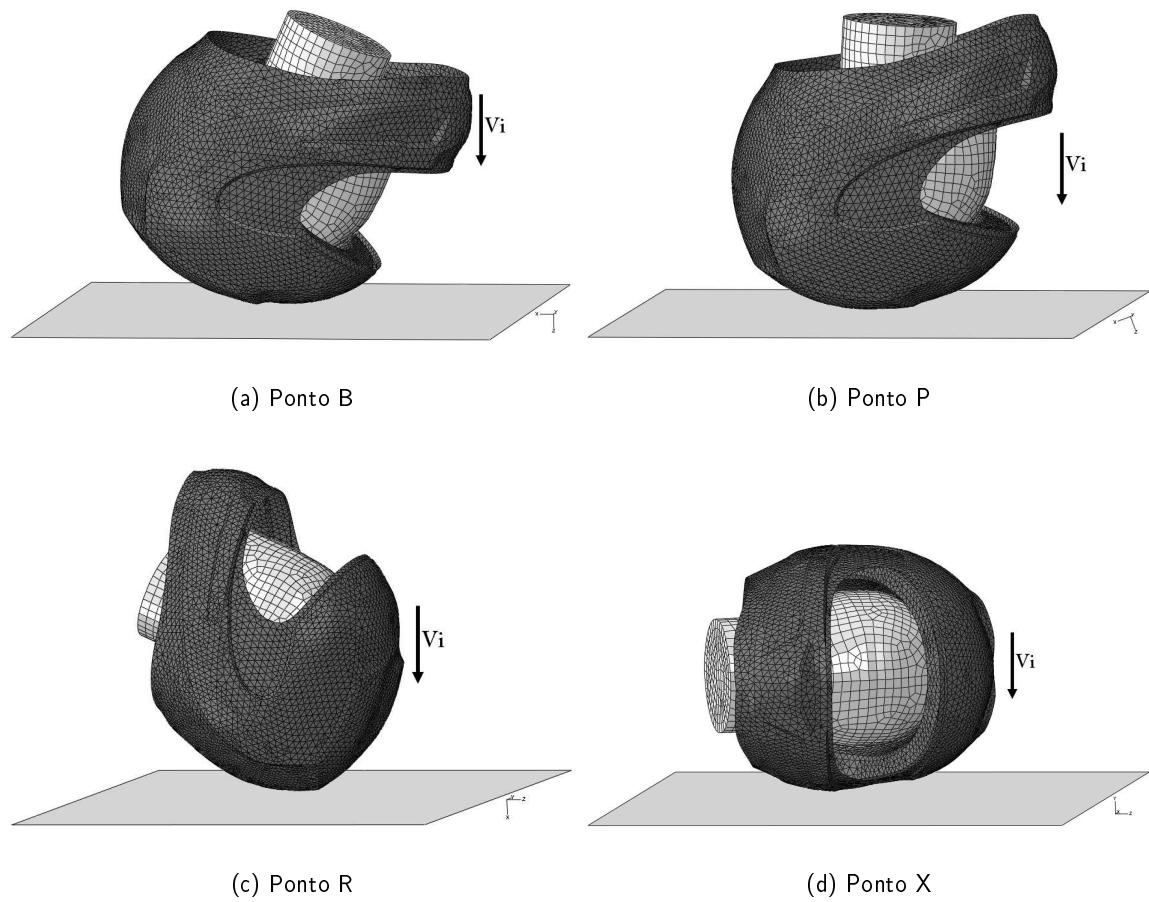


Figura 4.11: Configuração dos diferentes impactos realizados

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas simulações numéricas, realizadas em Abaqus™, dos diferentes impactos no capacete de mota com *padding* em cortiça micro-aglomerada ou EPS. Os resultados de interesse no âmbito da segurança passiva, de acordo com a norma ECE-R.22 - pico de aceleração e valores de HIC - são confrontados. Numa primeira fase, são confrontados com resultados obtidos experimentalmente, afim de verificar se o modelo é ou não viável. Por fim, avaliam-se as diferenças e os benefícios da implementação de um *padding* de cortiça micro-aglomerada.

Os resultados de interesse, no âmbito deste trabalho, são apresentados e discutidos nos parágrafos que se seguem. Numa primeira fase, é feita a validação do modelo numérico do capacete através da comparação dos resultados das simulações numéricas de impacto, utilizando *padding* em EPS, com os resultados experimentais. Assim, os gráficos da aceleração do centro de gravidade da cabeça, numéricos e experimentais, são representados nas figuras 5.1 à 5.4.

Como se pode observar existem algumas diferenças entre os valores experimentais e numéricos da aceleração do centro de gravidade da cabeça, para os diferentes pontos de impacto. Apesar disso, o modelo numérico consegue, de uma maneira geral, representar os valores obtidos experimentalmente. Assim, e analisando os diferentes gráficos mais detalhadamente, o ensaio numérico para o ponto B obtém valores bastante próximos, quer em termos de máximo valor obtido, quer para o tempo de impacto. Em oposto, o gráfico da aceleração para o impacto no ponto X, é o que se afasta mais dos valores experimentais. Neste impacto, quer o valor da sua duração, quer o pico de aceleração estão distantes. Isto pode dever-se ao facto do sistema de retenção do queixo e o *padding* de conforto não terem sido modelados. Nesta configuração de impacto, o modelo da cabeça, durante e após o impacto, move-se bastante e pode ter influenciado os valores de aceleração do seu centro de massa. A modelação destes dois componentes confere um melhor ajuste do modelo da cabeça ao capacete, o que evitaria movimentos excessivos da cabeça. Nos outros impactos, ponto P e ponto R, apesar de diferentes, a duração de impacto e valor máximo atingido são relativamente próximos. Outro factor importante a ter em consideração é que, para a realização dos testes experimentais, as densidades usadas quer no *padding*, quer na coroa de protecção foram diferentes. No caso, a densidade dos componentes usados nos ensaios experimentais foi de 50 kg/m³ para o *padding* e 40 kg/m³ para a coroa de protecção. Por outro lado, os ensaios numéricos foram realizados utilizando um casco feito em ABS, puramente elástico,

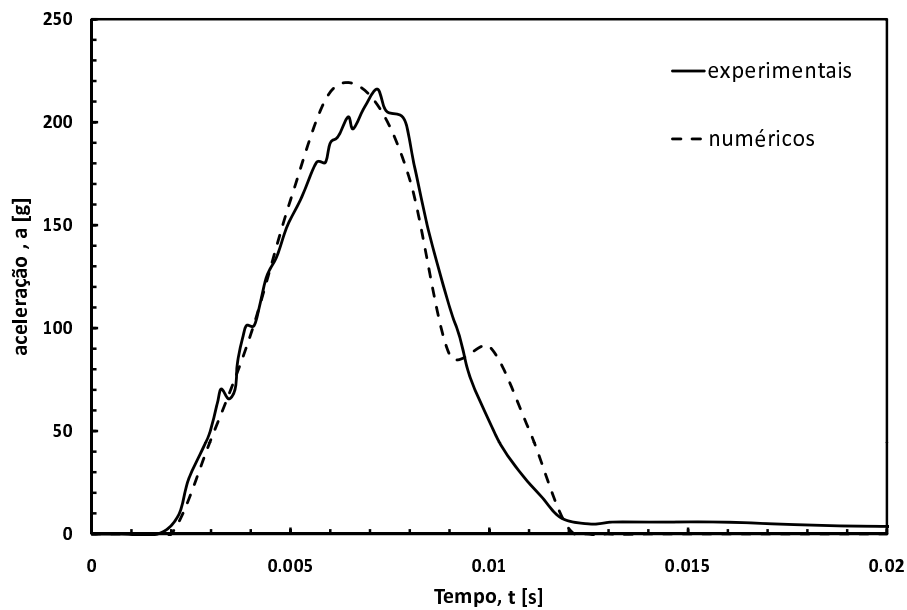


Figura 5.1: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto B).

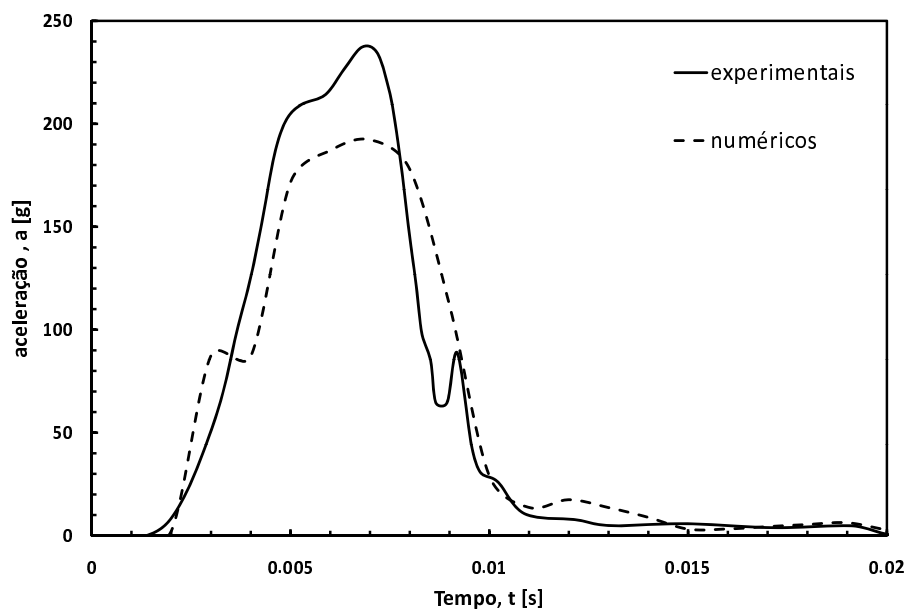


Figura 5.2: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto P).

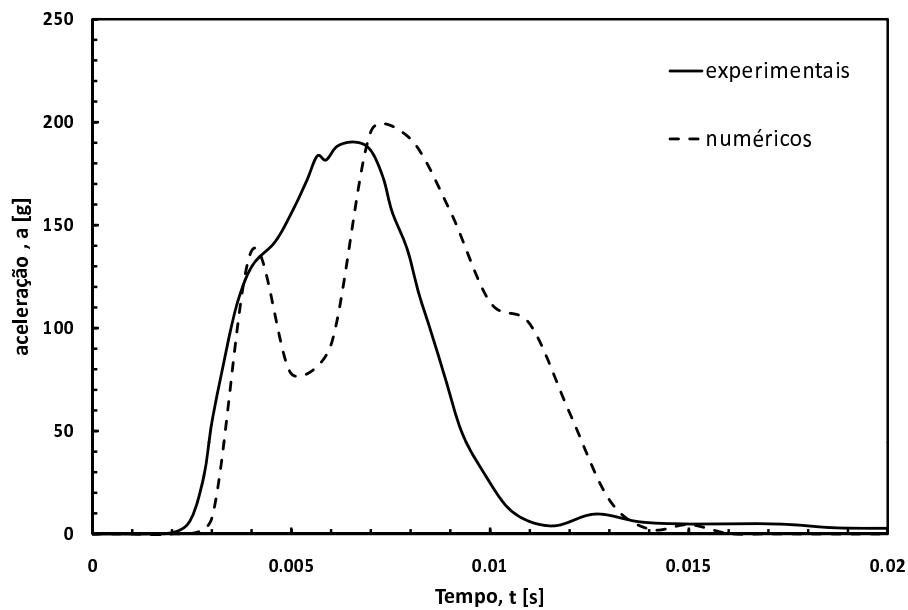


Figura 5.3: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto R).

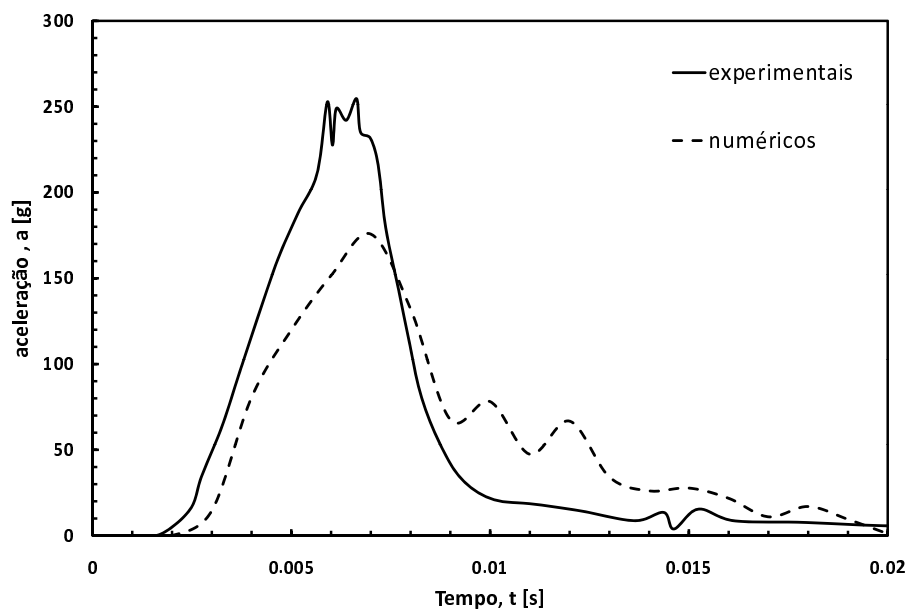


Figura 5.4: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto X).

enquanto que nos ensaios experimentais o casco era produzido em várias fibras (fibra de vidro, fibra de carbono e Kevlar). Esta diferença influencia os valores obtidos para a aceleração do centro de gravidade da cabeça e da duração do tempo de impacto.

Na tabela 5.1 apresentam-se os valores de HIC calculados e dos picos de aceleração, para os ensaios numéricos utilizando *padding* em EPS, e para os ensaios experimentais.

Tabela 5.1: Valores dos picos de aceleração para os ensaios numéricos e experimentais, nos diferentes pontos de impacto.

Ponto de Impacto		a_{max} [g]	HIC
ponto B	numérico	215	1612
	experimental	219	1886
ponto P	numérico	192	2409
	experimental	239	2404
ponto R	numérico	195	866
	experimental	190	1519
ponto X	numérico	176	549
	experimental	256	2017

Como se pode verificar, os valores de HIC calculados para os impactos nos pontos B e P são bastante próximos. Em contrapartida, os valores de HIC para os pontos de impacto R e X, são bastantes diferentes. Esta diferença de valores deve-se principalmente à diferença na duração de impacto, como se pode ver nos gráficos 5.3 e 5.4. Como se pode verificar, a duração dos impactos numéricos para estes pontos, é superior. Este valor influencia muito o cálculo do HIC.

No que diz respeito aos valores dos picos de aceleração, os impactos nos pontos B e R apresentam valores bastante próximos, enquanto que para os pontos P e X, são bastante diferentes. Esta diferença pode ser explicada, como anteriormente foi referido, pela não modelação do *padding* de conforto, pela diferença de densidades utilizadas nos componentes e pela não modelação do sistema de retenção.

Numa segunda fase, é feita a comparação dos valores obtidos para os ensaios numéricos utilizando *padding* em EPS e em cortiça micro-aglomerada. Assim, nesta fase utilizam-se as designações EPS e MA para nos referirmos ao capacete com o *padding* e coroa de absorção de energia em EPS e em cortiça micro-aglomerada, respectivamente, seguida da indicação do ponto de impacto onde o ensaio foi realizado (ponto B - impacto frontal; ponto P - impacto de topo; ponto R - impacto traseiro; e ponto X - impacto lateral). Assim, a título de exemplo, a designação MA-X, diz respeito ao impacto lateral (ponto X) com *padding* e coroa em cortiça micro-aglomerada.

Os resultados e discussão dos vários impactos centram-se principalmente no valor máximo da aceleração do centro de massa da cabeça, a_{max} e do valor do HIC calculado tendo em conta o gráfico da aceleração do centro de massa da cabeça, valores estes indispensáveis à obtenção da aprovação da norma Europeia ECE-R.22. É também analisado e comparado o gráfico da energia cinética do sistema, através do qual é estudada a capacidade de absorção de energia dos *padding*s em estudo.

A variação da aceleração no centro de massa da cabeça com o tempo, para os diferentes impactos são representados nos gráficos das figuras 5.5 à 5.8.

Como se pode verificar, a aceleração do centro de gravidade da cabeça é nula até a um determinado instante, altura em que ocorre, na maioria dos impactos, um aumento do valor da aceleração até ao seu valor máximo. Através da análise dos resultados sobre a forma de uma animação, podemos verificar que esse instante corresponde ao impacto em que a cabeça entra em contacto com o *padding*. Após o pico de aceleração os valores começam a decrescer até zero ou um valor muito baixo. Os instantes de tempo em que ocorre o contacto da cabeça com o *padding*,

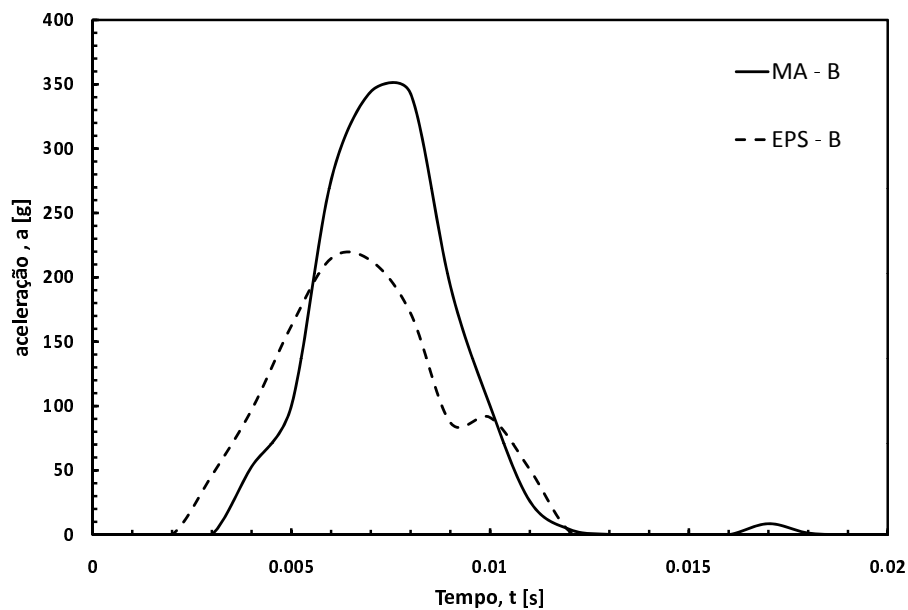


Figura 5.5: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto B) com *padding* de cortiça micro-aglomerada e de EPS.

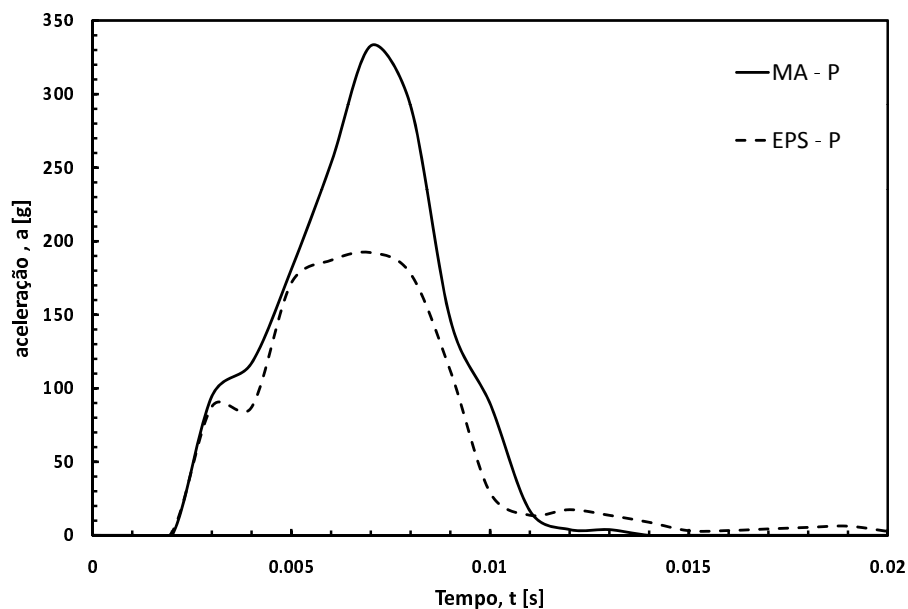


Figura 5.6: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto de topo (ponto P) com *padding* de cortiça micro-aglomerada e de EPS.

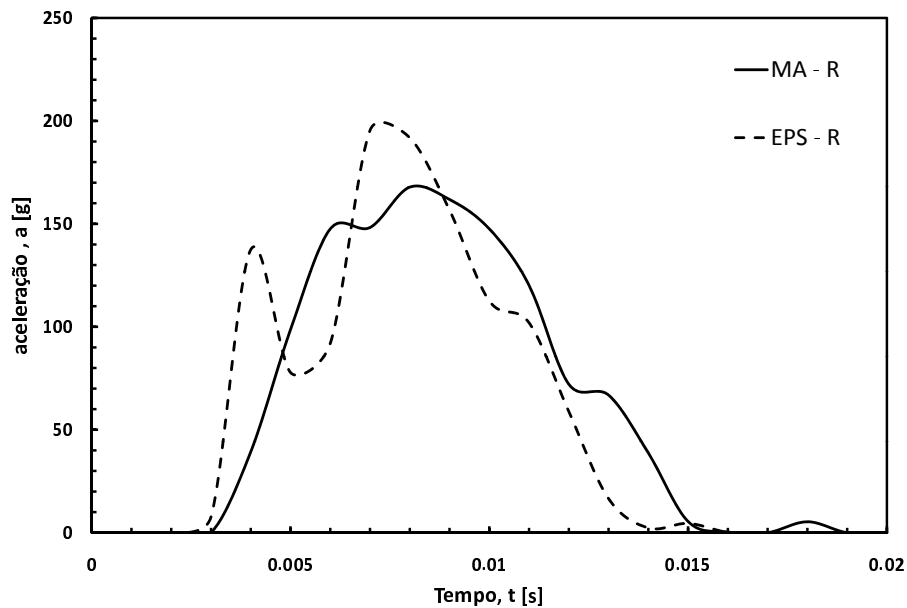


Figura 5.7: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto traseiro (ponto R) com *padding* de cortiça micro-aglomerada e de EPS.

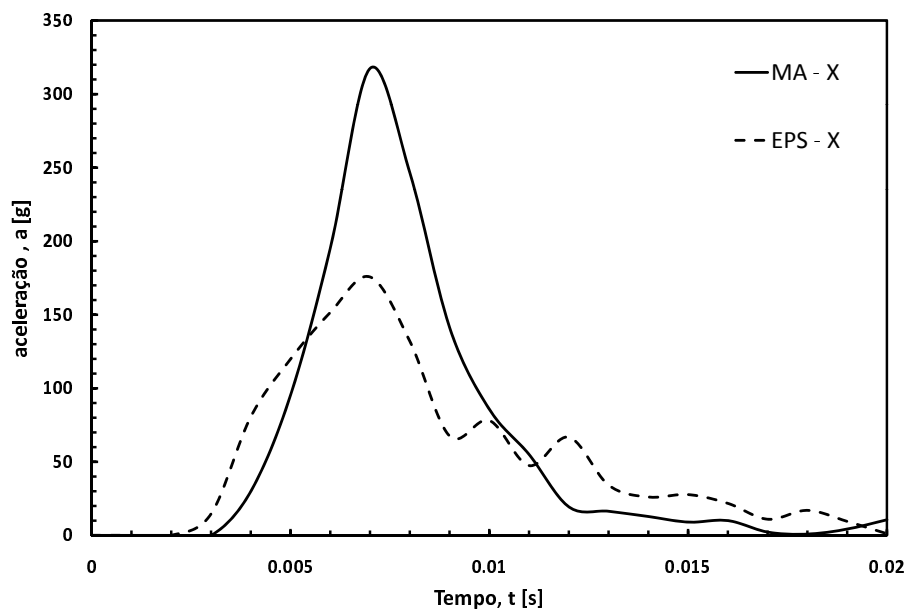


Figura 5.8: Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto lateral (ponto X) com *padding* de cortiça micro-aglomerada e de EPS.

a forma da curva da aceleração em função do tempo e o instante em que o pico de aceleração se dá podem ser diferentes para os diferentes impactos.

Assim, no impacto frontal (ponto B), figura 5.5, utilizando o *padding* em EPS ocorre para $t \approx 2$ ms sendo crescente até ao instante $t \approx 6$ ms, onde ocorre o máximo de aceleração, $a_{max} = 214$ g. Após o pico de aceleração, esta começa a decrescer até atingir o valor zero para o instante $t \approx 12$ ms. Quando é simulado o *padding* em cortiça micro-aglomerada, esses valores são diferentes. Assim, a aceleração mantém-se nula até ao instante $t \approx 3$ ms sendo crescente até ao instante $t \approx 7$ ms, instante em que atinge o seu valor máximo de aceleração $a_{max} = 344$ g, sendo seguido de um decréscimo até atingir o valor zero para $t \approx 13$ ms. Assim, a utilização de um *padding* em cortiça micro-aglomerada leva a uma aumento de cerca de 38% do valor máximo da aceleração do centro de massa da cabeça relativamente à utilização do *padding* em EPS.

Para o impacto de topo (ponto P), figura 5.6, utilizando *padding* em EPS ou cortiça, o aumento da aceleração ocorre para o mesmo valor, $t \approx 2$ ms e é crescente até $t \approx 7$ ms, onde ocorre o valor máximo da aceleração, $a_{max} = 192$ g e $a_{max} = 333$ g, para o *padding* em EPS ou cortiça, respectivamente. Isto representa um aumento de 42 % do valor máximo da aceleração, quando é utilizado *padding* em cortiça. Após o pico de aceleração, esta decresce e atinge um valor mínimo, que no caso do *padding* em EPS é de $a = 2$ g no instante $t \approx 20$ ms (fim do tempo da simulação), e no caso do *padding* em cortiça é zero para o instante $t \approx 14$ ms.

No impacto traseiro (ponto R), figura 5.7, a forma do gráfico da aceleração é um pouco diferente. Utilizando o *padding* em EPS, o contacto da cabeça contra o mesmo ocorre para $t \approx 2.5$ ms, sendo que a aceleração do centro de gravidade da cabeça não aumenta até ao seu valor máximo. Assim, após o contacto da cabeça com o *padding*, a aceleração sofre um aumento até $a_{max} = 137$ g para $t \approx 4$ ms, decrescendo para $a_{max} = 77$ g no instante $t \approx 5$ ms, e sofrendo novo aumento, até ao seu valor máximo $a_{max} = 195$ g no instante $t \approx 7$ ms, momento em que o capacete começa a fazer ricochete. Após esse momento, a aceleração decresce até atingir um valor nulo para $t \approx 17$ ms. Quando é simulado o impacto utilizando o *padding* em micro-aglomerado de cortiça, a curva não apresenta o mesmo comportamento irregular. Assim, o contacto entre a cabeça e o *padding* ocorre para $t \approx 3$ ms levando a um aumento da aceleração até ao seu valor máximo $a_{max} = 167$ g no instante $t \approx 7$ ms, seguido de um decréscimo até $a = 0$ g no instante $t \approx 16$ ms. Com isto, a utilização do *padding* em cortiça levou a uma diminuição do valor máximo da aceleração de cerca de 14%.

Por fim, no impacto lateral (ponto X), figura 5.8, utilizando *padding* em EPS, o valor da aceleração mantém-se nulo até $t \approx 2$ ms, aumentando até ao valor máximo de $a_{max} = 176$ g no instante $t \approx 7$ ms e decrescendo até a um valor mínimo de aceleração, $a \approx 1$ g, no fim da simulação, $t \approx 20$ ms. No caso do *padding* em cortiça, é nulo até $t \approx 3$ ms aumentando até $a_{max} = 317$ g no instante $t \approx 7$ ms, o que representa um aumento de cerca de 44.5% relativamente à utilização do EPS. Após esse instante a aceleração decresce até a ≈ 0.8 g no instante $t \approx 18$ ms e volta a crescer até atingir um valor de $a \approx 10$ g no fim da simulação.

É com base nos gráficos da aceleração do centro de massa da cabeça que se calcula o valor de HIC, afim de verificar se o seu valor máximo se encontra dentro dos limites estabelecidos pela norma europeia.

Assim, os valores obtidos para a aceleração máxima e para o HIC calculado para os diversas simulações de impacto, indispensáveis para a atribuição da certificação da norma Europeia, estão representados na tabela 5.2.

Nos gráficos das figuras 5.9 à 5.12 estão representadas a evolução da energia cinética do sistema com o tempo para os diferentes impactos simulados.

Como se pode observar, a energia cinética, apesar de diferente consoante o caso em estudo, mantém-se constante até ao instante $t \approx 1$ ms. Este instante corresponde ao momento e que o capacete inicia o contacto com a plataforma de impacto. A partir daí, como seria de esperar, existe

Tabela 5.2: Valores dos picos de aceleração das várias simulações de impacto realizadas, e o respectivo valor do *HIC* para *padding* de EPS e de cortiça micro-aglomerada.

Ponto de Impacto	<i>padding</i>	a_{max} [g]	HIC	Limites
ponto B	EPS	215	1612	HIC < 2400 a_{max} < 275 g
	cortiça	344	2909	
ponto P	EPS	192	2409	
	cortiça	333	2899	
ponto R	EPS	195	866	
	cortiça	167	1250	
ponto X	EPS	176	549	
	cortiça	317	858	

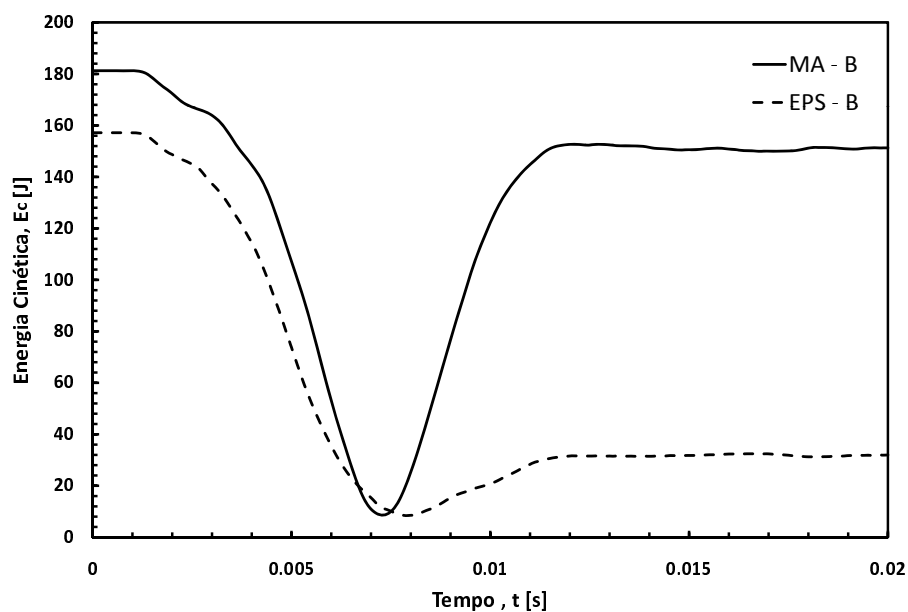


Figura 5.9: Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto B) com *padding* de cortiça micro-aglomerada e de EPS.

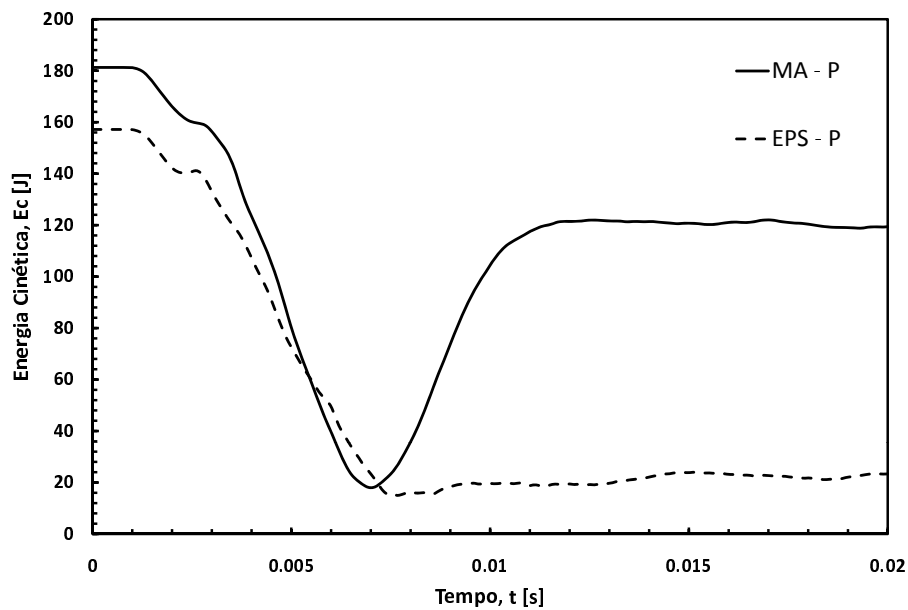


Figura 5.10: Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto de topo (ponto P) com *padding* de cortiça micro-aglomerada e de EPS.

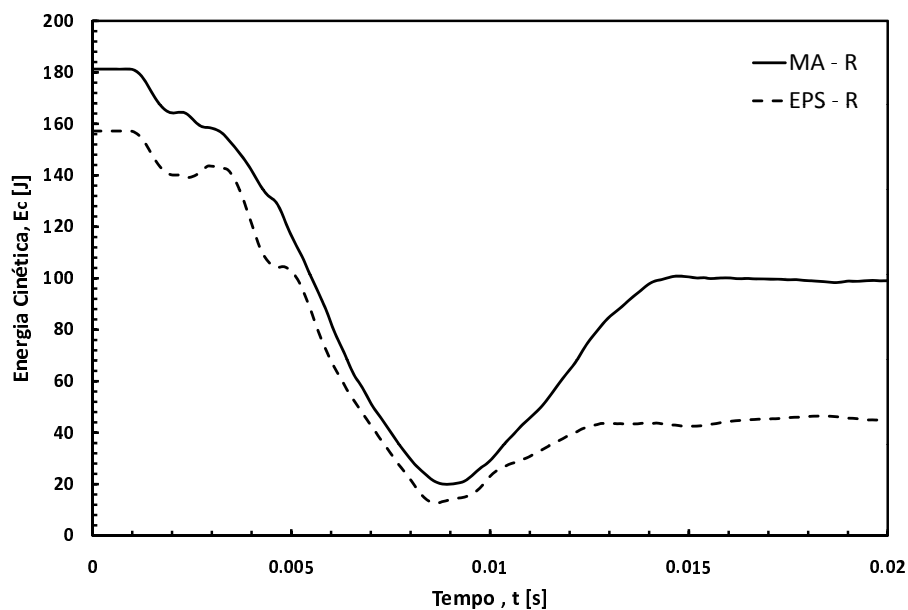


Figura 5.11: Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto traseiro (ponto R) com *padding* de cortiça micro-aglomerada e de EPS.

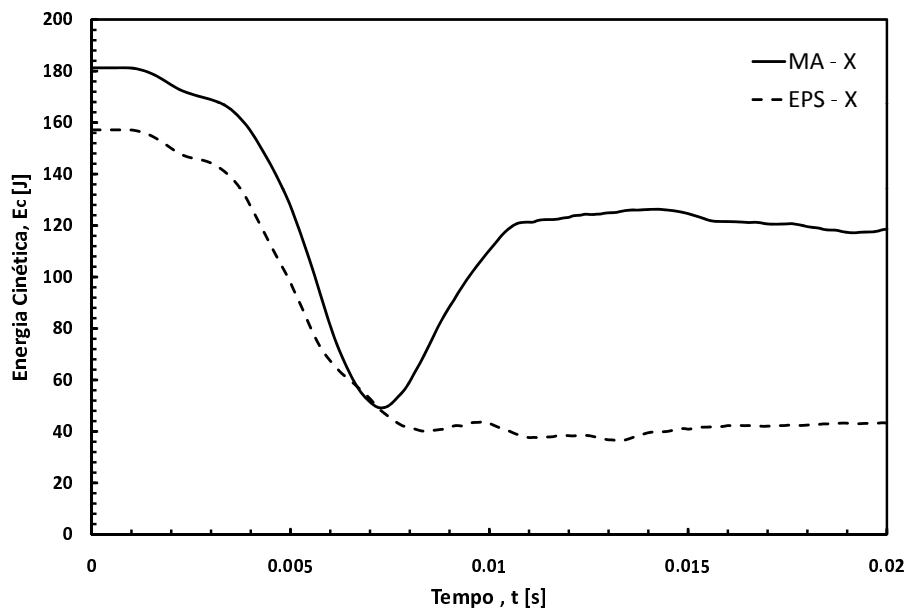


Figura 5.12: Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto lateral (ponto X) com *padding* de cortiça micro-aglomerada e de EPS.

dissipação de energia o que corresponde uma evolução decrescente da energia cinética, em todos os casos estudados. Como se pode observar, existe uma diferença nos valores iniciais da energia cinética quando se estuda o *padding* em EPS ou em cortiça micro-aglomerada. Essa diferença deve-se ao facto de a cortiça micro-aglomerada ser mais densa do que o EPS, o que leva a que o *padding* de cortiça tenha mais massa do que o de EPS, e conseqüentemente uma maior energia cinética inicial do sistema.

Em todas as simulações realizadas, a curva de energia cinética apresenta uma tendência decrescente até um determinado ponto, onde, a partir daí a tendência é invertida, sendo crescente até à estabilização num determinado valor de energia. Através da análise dos resultados sob a forma de uma animação, pode verificar-se que o instante em que a energia cinética atinge o seu valor mínimo corresponde ao momento em que o capacete começa a ter o movimento contrário ao inicial, ou seja, faz ricochete, levando a um aumento da energia cinética até ao ponto em que o capacete deixa de estar em contacto com a plataforma, sendo constante a partir desse momento. Os momentos em que ocorrem bem como o valor da energia cinética envolvida variam consoante o impacto simulado e o *padding* em estudo. De uma maneira geral pode verificar-se que as simulações utilizando *padding* em cortiça micro-aglomerada apresentam uma energia cinética bastante maior após o impacto, ou seja absorvem menos energia do que as que utilizaram *padding* em EPS. Este facto poderá dever-se ao facto da cortiça, como já foi referido, apresenta retorno elástico, que poderá ter levado a uma maior energia cinética após o contacto do capacete com a plataforma.

Por fim, é comparada a espessura do *padding*, após impacto, quando este é feito em EPS e em cortiça micro-aglomerada. Nas figura 5.13 e 5.14 estão representadas as espessuras inicial e final do *padding* em EPS e em cortiça micro-aglomerada no impacto frontal (ponto B).

Como se pode verificar através da figura 5.13, o *padding* em EPS sofre uma deformação permanente bastante grande. Antes do impacto, para o *padding* feito nos dois materiais, EPS e cortiça micro-aglomerada, a sua espessura é, $L_i = 33$ mm. Após o impacto, no caso do *padding* em EPS, que possui um retorno elástico bastante pequeno, essa espessura passa a ser $L_f = 14.3$ mm,

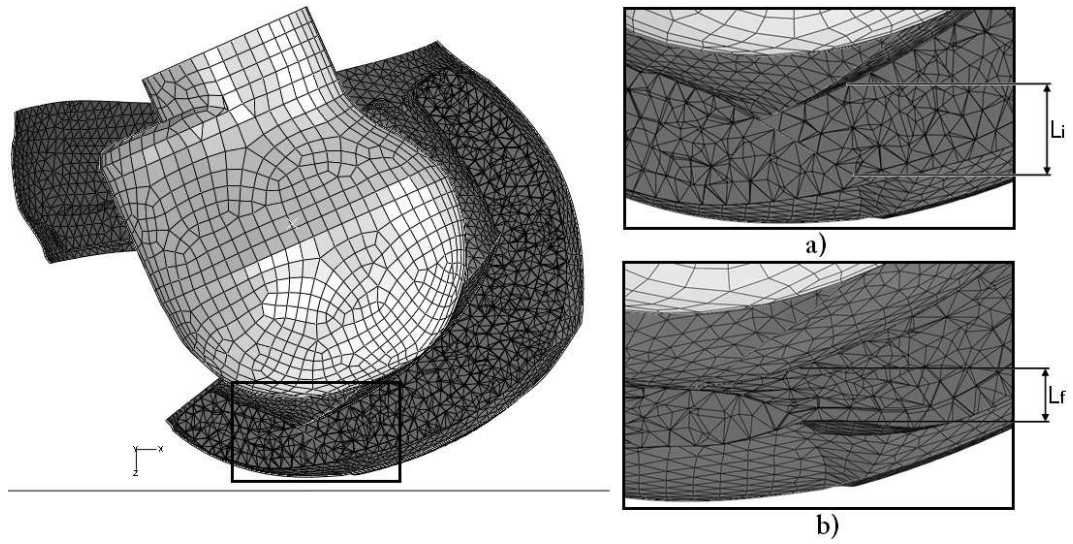


Figura 5.13: Espessura do *padding* em EPS antes (a) e após impacto (b).

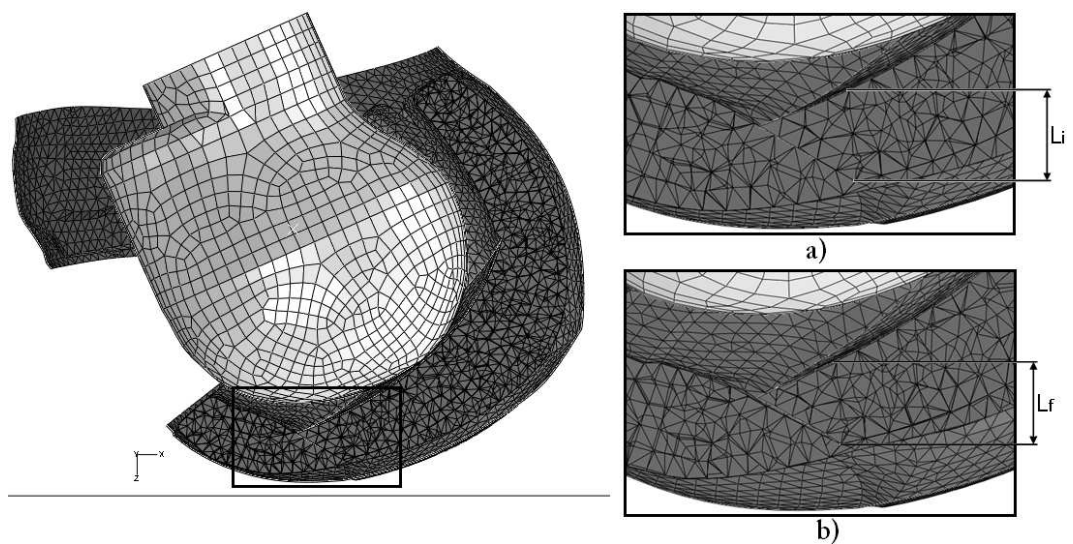


Figura 5.14: Espessura do *padding* em cortiça micro-aglomerada antes (a) e após impacto (b).

o que representa uma deformação de cerca de 57%. Isto leva a que, após o primeiro impacto a sua capacidade de absorção de energia fica bastante reduzida. No caso da cortiça micro-aglomerada, devido ao seu retorno elástico, esse comprimento não é alterado, continuando a ser $L_f = L_i = 33$ mm. Isto não representa fielmente a realidade, pois a cortiça, apesar de possuir um retorno elástico muito grande, esse retorno não é total.

Comparando os dois resultados, com o *padding* em EPS e cortiça micro-aglomerada, podemos verificar que a cortiça tem clara vantagem sobre o EPS em impactos duplos, pois, como se pode verificar através da figura 5.14, a espessura do *padding* após o impacto não se altera, o que significa que a sua capacidade de absorção de energia não se reduz. Assim, existe uma grande vantagem por parte da cortiça no que diz respeito a duplos impactos, como pressupõe a norma Snell (secção 1.2).

Parte IV

Discussão e Conclusões

Capítulo 6

Discussão e Conclusões Gerais

Neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais e discutem-se os resultados obtidos na realização deste trabalho. Para terminar são apresentadas algumas sugestões a desenvolver em trabalhos futuros.

6.1 Conclusões gerais

O objectivo principal deste trabalho consiste no estudo da viabilidade de uma aplicação inovadora de micro-aglomerado de cortiça como material de absorção de energia em sistemas de segurança passiva, nomeadamente capacetes rodoviários.

Numa primeira fase do trabalho, realizaram-se ensaios de caracterização dos dois materiais usados na realização dos ensaios numéricos, a cortiça micro-aglomerada e o EPS (EPS 22 e EPS 59). O objectivo dessa caracterização era, por um lado verificar se o modelo escolhido para modelar cada material era o ideal, e por outro o acerto dos parâmetros numéricos dos modelos escolhidos para modelar o comportamento de cada material.

De acordo com os resultados obtidos nas simulações numéricas de caracterização realizadas, pode concluir-se que o modelo escolhido para cada material consegue, de uma maneira geral, representar correctamente o comportamento real do material em estudo. No diz respeito ao EPS, o modelo numérico escolhido, *Crushable Foam, consegue modelar quase fielmente o comportamento real do material. No que diz respeito ao modelo escolhido para a cortiça micro-aglomerada, *Hyper Foam, não conseguimos um ajuste tão bom da curva. A cortiça é caracterizada por possuir uma zona elástica, onde se comporta como um material linear-elástico, seguida de uma zona de patamar. O modelo escolhido não consegue modelar a zona inicial linear-elástica, afastando-se um pouco da curva experimental. Contudo, esta diferença não deverá ter influência nos resultados obtidos.

Na segunda parte desta dissertação, realizaram-se impactos sobre uma plataforma plana em diversos pontos de um capacete, de acordo com a norma europeia ECE-R.22. Os resultados obtidos centram-se principalmente no gráfico da aceleração do centro de massa da cabeça e dos valores de HIC, pois são, como foi dito anteriormente, indispensáveis para atribuição da norma. Analisa-se também a energia cinética do sistema, pois esta representa a energia de impacto que foi absorvida ao longo do mesmo.

Primeiramente compararam-se os gráficos da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, os valores de aceleração máxima e valores de HIC numéricos, com resultados de impactos experimentais. Esta comparação tem como objectivo avaliar se o modelo de elementos finitos

do capacete é ou não fiável. Assim, de acordo com os resultados obtidos, podemos verificar que existem algumas diferenças significativas entre os resultados numérico e experimental em alguns ensaios. Estas diferenças, mais evidentes nos impactos de topo (ponto P) e lateral (ponto X), podem dever-se ao facto do modelo numérico criado ser simplificado, não contendo o *padding* de conforto nem o sistema de retenção. Estes dois componentes conferem um melhor ajuste da cabeça ao capacete, antes e durante o impacto, não permitindo que esta saia ou tenha movimentos de grande amplitude dentro do mesmo. Por outro lado, as densidades usadas no *padding* de protecção e o material usado na produção do casco, para a realização dos ensaios experimentais, foi diferente. A conjugação destes factores pode ter levado às diferenças obtidas entre os ensaios numéricos e experimentais. Apesar de tudo, de acordo com os resultados obtidos pode concluir-se que o modelo numérico é fiável e lança as bases de investigação nesta área.

Numa segunda fase, analisaram-se os resultados numéricos de impacto do capacete usando *padding* em EPS e em cortiça micro-aglomerada. De acordo com os gráficos da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, pode-se concluir que o EPS é quem apresenta melhores resultados, uma vez que na maioria dos ensaios realizados apresenta picos de aceleração inferiores à cortiça, com a excepção do impacto traseiro. Neste impacto a cortiça obteve um pico de aceleração inferior, que pode ser explicado pela melhor distribuição de força por parte deste material. A parte de traz do capacete em estudo apresenta uma saliência, o que causa forças concentradas. Como a cortiça possui uma melhor capacidade de distribuir forças, o pico de aceleração neste impacto é inferior quando se usa o *padding* em cortiça. Como foi referido, para ser atribuída a homologação por parte da norma europeia, o valor máximo da aceleração para cada impacto tem de ser inferior a 275 g. De acordo com os resultados obtidos, todos os impactos utilizando *padding* em EPS estão abaixo do limite estabelecido, e conseqüentemente passariam na certificação da norma. No que diz respeito ao capacete utilizando *padding* em cortiça micro-aglomerada, apenas o impacto traseiro apresenta valores de aceleração máxima abaixo do limite estabelecido. Com isto, o capacete não conseguiria a homologação. Os valores mais altos da aceleração da cabeça quando é utilizado *padding* em cortiça micro-aglomerada, pode ser explicado, em parte pelas características da cortiça utilizada e pela não modelação do sistema de retenção do queixo. Como o sistema de retenção do queixo não foi modelado, isto permite que a cabeça se possa separar do resto do capacete após o impacto. Este efeito aliado ao facto da cortiça ser mais densa e com retorno elástico, o que leva a um maior ricochete da cabeça após o impacto, pode ter levado aos valores elevados da aceleração do centro de gravidade da cabeça.

No que diz respeito ao cálculo do HIC, a norma propõem um limite de 2400. Com isto, e tendo em conta os resultados obtidos, podemos concluir que o capacete utilizando o *padding* em EPS apresenta melhores resultados, uma vez que em todos os impactos simulados, o valor de HIC mantém-se dentro do limite estabelecido. No caso do *padding* em cortiça, apenas no impacto traseiro e no impacto lateral, conseguiu valores de HIC inferiores ao limite, o que implica a não certificação por parte da norma.

Analisando os gráficos de energia cinética do sistema, verifica-se que em todos os ensaios numéricos realizados, o capacete utilizando *padding* em EPS apresenta valores de energia cinética, após o impacto, inferiores ao capacete utilizando *padding* em cortiça. Este facto deve-se, por um lado à cortiça micro-aglomerada ser mais densa e por outro possuir retorno elástico (o EPS possui um retorno elástico muito baixo). Estas características levam a um maior ricochete por parte do capacete, o que implica uma maior energia cinética após o impacto, e logo menos energia absorvida.

Por outro lado, com a análise dos diversos impactos sobre a forma de animações, verifica-se que nos impactos envolvendo *padding* em EPS, a capacidade de absorção de energia deste material era quase totalmente utilizada. Com isto, um segundo impacto no mesmo ponto (a norma Snell e DOT prevêem dois impactos no mesmo ponto) levaria a maiores lesões na cabeça, uma vez

que o material de absorção de energia esgotou toda as suas capacidades no primeiro impacto. Este problema não se coloca quando é utilizado o *padding* em cortiça, uma vez que esta possui um retorno elástico quase total, ou seja, após o primeiro impacto o material volta à sua forma inicial, o que possibilita nova absorção de energia aquando um segundo impacto nesse ponto. Outra vantagem da utilização do *padding* em cortiça é esta possuir, como foi evidente no impacto traseiro, uma maior capacidade de distribuição de forças de impacto. No impacto traseiro, o capacete possui uma saliência o que leva à existência de cargas concentradas. Nesse impacto o capacete utilizando *padding* em cortiça obteve melhores resultados, pois como foi dito, consegue uma distribuição mais efectiva da carga.

Como foi referido, neste trabalho não foi modelado o *padding* de conforto, nem o sistema de retenção do queixo. A falta destes dois componentes podem ter influenciado os resultados. Por um lado, o *padding* de conforto confere um melhor ajustamento da cabeça ao capacete, e por outro, os sistema de retenção do queixo permite que o capacete não se separe da cabeça durante e após o impacto. Esta situação torna-se mais evidente no capacete com *padding* em cortiça micro-aglomerada, pois devido à sua densidade mais elevada e ao seu retorno elástico possibilita um ricochete maior, o que leva a uma maior aceleração da cabeça.

Contudo, a conclusão geral que se obtém deste trabalho é que a utilização de *padding* unicamente constituído em cortiça micro-aglomerada não é viável para a configuração de *padding* de absorção de energia estudada, pois o capacete utilizando este material obteve, de uma maneira geral, valores mais elevados de acelerações na cabeça e maiores valores de HIC, não conseguindo a atribuição da homologação por parte da norma ECE-R.22.

Todavia, os resultados obtidos são promissores na medida em que, a cortiça apresenta uma melhor capacidade de distribuição de forças, verificado numa redução do valor máximo da aceleração no impacto traseiro (ponto R). Outra clara vantagem da cortiça prende-se com o facto de esta possuir um retorno elástico quase total, o que, no caso de duplo impacto, requisito imposto pela norma Snell, a sua capacidade de absorção de energia é quase inalterável.

6.2 Trabalhos futuros

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo numérico de um capacete rodoviário simplificado, afim de verificar a viabilidade de implementação de *padding* de protecção em cortiça micro-aglomerada. Concluiu-se que o modelo numérico realizado é fiável e lancha as bases de investigação nesta área. Contudo, para a configuração de *padding* de protecção usada, verifica-se que a sua utilização em cortiça micro-aglomerada não é viável. Apesar disso, este trabalho é apenas um pequeno passo na investigação nesta área, lançando bases para próximos trabalhos. Neste contexto sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Modelação dos componentes do capacete em falta, ou seja, modelação do *padding* de conforto e sistema de retenção;
- Caracterização numérica mais detalhada do comportamento da cortiça micro-aglomerada, possivelmente construindo um novo modelo de comportamento numérico;
- Modelação adequada do casco, no que diz respeito ao seu material constituinte;
- Utilização de *padding* de protecção composto, ou seja, com incorporação de diferentes materiais.

Lista de Figuras

1.1	Capacete Coríntiano do Século V a.C.	4
1.2	Corte transversal de um capacete integral de moto [2].	4
1.3	(a) - Veículos intervenientes em acidentes em Portugal. (b) - Condutores feridos graves segundo a categoria de veículo em Portugal. (c) - Condutores mortos segundo a categoria de veículo em Portugal [5].	8
1.4	Modos de deformação de capacetes com cascos em FRP (esquerda) e PC (direita) [14].	10
1.5	Modelo de massas aglomeradas de um capacete [3].	12
1.6	Modos de transferência de forças para a cabeça durante um impacto [3].	13
1.7	(a) - Modelo da cabeça <i>Hybrid III</i> ; (b) - Modelo da cabeça <i>Bi-mass 150</i>	14
1.8	Teste de impacto oblíquo realizado por Halldin <i>et al.</i> [30], onde V_h representa a velocidade horizontal do prato e V_v a velocidade perpendicular de impacto.	16
1.9	Identificação dos pontos de impacto de acordo com a norma ECE-R.22/05 [2].	21
1.10	Teste de retenção (teste de estabilidade posicional) [2].	23
1.11	Exemplo da estrutura para o teste de projecções e de fricção (método A) [2].	24
1.12	Wayne State Tolerance Curve [37].	26
1.13	Descortiçamento de um sobreiro e aparência dos sobreiros após extracção da cortiça.	32
1.14	Pranchas de cortiça empilhadas após extracção do sobreiro [55].	32
1.15	Estrutura das vendas de Cortiça por tipo de produtos [55].	34
1.16	Desenhos de Robert Hooke da estrutura da cortiça [58].	35
1.17	Representação esquemática da disposição das células de cortiça no tronco, definindo as três direcções [59].	35
1.18	Observação com microscópio electrónico de varrimento da estrutura celular da cortiça na direcção radial [55].	36
1.19	Representação esquemática de uma célula de cortiça.	37
3.1	Representação esquemática da configuração dos ensaios numéricos realizados para ajuste do comportamento mecânico dos materiais utilizados. Localização do ponto de referência A, utilizado para análise de resultados.	48
3.2	Representação esquemática do elemento finito sólido tetraédrico com quatro nós utilizado para a caracterização do comportamento dos materiais.	49
3.3	Exemplos de folhas de Poliestireno expandido (EPS).	50
3.4	Alguns exemplos de folhas de cortiça micro-aglomerada.	51
3.5	Curva de comportamento à compressão da cortiça micro-aglomerada [61].	52
3.6	(a) - Curvas tensão-deformação do EPS de densidade $\rho = 22$ [kg/m ³]. (b) - Curvas tensão-deformação do EPS de densidade $\rho = 59$ [kg/m ³]	54
3.7	Caracterização do comportamento da cortiça micro-aglomerada para diferentes valores de Coeficiente de Poisson.	55

4.1	Modelo composto por dois materiais, antes e depois da discretização.	60
4.2	Pontos de impacto nas simulações numéricas realizadas.	62
4.3	Capacete real usado para a realização do modelo 3D.	63
4.4	(a) - Nuvem de pontos do casco do capacete fornecida pela NEXX. (b) - Modelo final em superfícies do casco.	63
4.5	(a) - Modelo em superfícies do <i>padding</i> de protecção fornecida pela NEXX. (b) - Modelo final em superfícies do <i>padding</i> de protecção.	64
4.6	Modelo em superfícies desenvolvido da coroa de protecção.	64
4.7	Modelo em superfícies da cabeça, tamanho J, desenvolvido de acordo com as especificações da norma ECE-R.22.	65
4.8	Modelo em elementos finitos do casco.	66
4.9	Modelo em elementos finitos do <i>padding</i> (a) e da coroa (b) de protecção.	67
4.10	Modelo em elementos finitos do modelo da cabeça (tamanho J)	67
4.11	Configuração dos diferentes impactos realizados	69
5.1	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto B).	72
5.2	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto P).	72
5.3	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto R).	73
5.4	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto X).	73
5.5	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto B) com <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada e de EPS.	75
5.6	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto de topo (ponto P) com <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada e de EPS.	75
5.7	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto traseiro (ponto R) com <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada e de EPS.	76
5.8	Variação da aceleração do centro de massa do modelo da cabeça, em múltiplos da aceleração da gravidade, em função do tempo, para as simulações de impacto lateral (ponto X) com <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada e de EPS.	76
5.9	Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto frontal (ponto B) com <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada e de EPS.	78
5.10	Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto de topo (ponto P) com <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada e de EPS.	79
5.11	Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto traseiro (ponto R) com <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada e de EPS.	79
5.12	Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto lateral (ponto X) com <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada e de EPS.	80
5.13	Espessura do <i>padding</i> em EPS antes (a) e após impacto (b).	81
5.14	Espessura do <i>padding</i> em cortiça micro-aglomerada antes (a) e após impacto (b).	81

Lista de Tabelas

1.1	<i>Abbreviated Injury Scale</i> . [7]	5
1.2	Número de mortes em acidentes de motos em vários países [9].	6
1.3	Número de vítimas mortais e feridos graves de acidente envolvendo utentes de duas rodas em Portugal [5].	7
1.4	Resumo das normas de capacetes [9].	19
1.5	Resumo das normas de capacetes [9].	19
1.6	<i>Abbreviated Injury Scale</i> e correspondentes valores de HIC (intervalo de 15 ms) [7].	27
1.7	Tolerância humana à aceleração e velocidade rotacional relativamente ao movimento sagital da cabeça.	28
1.8	Área de montado de sobre em diversos países [55].	33
3.1	Propriedades mecânicas das espumas de EPS utilizadas na sua caracterização [97].	50
3.2	Propriedades mecânicas da cortiça micro-aglomerada utilizadas na caracterização dos materiais [61].	52
4.1	Propriedades do modelo da cabeça desenvolvido (tamanho J).	65
4.2	Propriedades do ABS [9].	66
4.3	Características das malhas de elementos finitos atribuídas aos componentes do modelo global utilizado nas simulações numéricas de impacto frontal realizadas no âmbito deste trabalho.	67
5.1	Valores dos picos de aceleração para os ensaios numéricos e experimentais, nos diferentes pontos de impacto.	74
5.2	Valores dos picos de aceleração das várias simulações de impacto realizadas, e o respectivo valor do <i>HIC</i> para <i>padding</i> de EPS e de cortiça micro-aglomerada.	78

Bibliografia

- [1] A. H. S. HOLBOURN. The mechanics of brain injuries. *Br Med Bull*, 3(6):147–149, January 1945.
- [2] UN. Regulation no. 22: Uniform provisions concerning the approval of protective helmets and of their visors for drivers and passengers of motorcycles and mopeds. Technical report, United Nations, Economic Commission for Europe (working party 29), Geneva, SUI., 2000.
- [3] A. Gilchrist and N. J. Mills. Deformation analysis for motorcycle helmets. In *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts*, pp. 269-281, Eindhoven, The Netherlands., 1993.
- [4] EEVC. Report in motorcycle safety. Technical report, European Experimental Vehicles Committee ad-hoc group, 1993.
- [5] Observatório de Segurança Rodoviária. Sinistralidade rodoviária. Technical report, Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, 2007.
- [6] D. Otte, A. J. Kuhnel, E. G. Suren, H. Weber, and G. Gotzen, L. & Schockenhoff. Erhebungen am unfallort; unfall- und sicherheitsforschuns strassenverkehr. *Helft*, vol. 37:pp. 7–10, 1982.
- [7] AAAM. Abbreviated injury scale. Technical report, Association for the Advancement of Automotive Medicine, nd.
- [8] P.L. Harms. Crash injury investigation and injury mechanisms in road traffic accidents. *Accident and Emergency Nursing*, vol. nd(1):pp. nd, January 1993.
- [9] H. L. A. van den Bosch. *Crash Helmet Testing and Design Specifications*. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2006.
- [10] IIHS. Special issue: Motorcycle deaths. Technical report, Insurance Institute for Highway Safety, 2001.
- [11] J. Goldstein. Review of helmet and helmet law effectiveness stuies. Technical report, <http://www.bikersrights.com/statistics/goldstein/reviews/reviews.html>, Dowdoin college, Department of Economics, Brunswick, ME (USA), 1988.
- [12] L. Evans and M. C. Frick. Helmet effectiveness in preventing motorcycle driver and passenger fatalities. Technical report, General motors research publication no. gmr-5602., 1986.
- [13] H. H. Hurt Jr., J. V. Ouellet, and D. R. Thom. Motorcycle accident cause factors and identification of countermeasures. vol.1. Technical report, DOT HS-5-01160, US Department of Transportation NHTSA, 1981.

- [14] M. C. Beusenbergh and R. Happee. An experimental evaluation of crash helmet design and effectiveness in standard impacts tests. In *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts*, pp. 307-323, Eindhoven., 1993.
- [15] E. Shuller and G. Beier. Safety helmets shell material and head injury incidence in motorcycle accidents. In *6th IRCOBI Conference on Biomechanics of Impacts*, pp. 184-192, Salon de Provence, France., 1981.
- [16] P. D. Hopes and B. P. Chinn. Helmets: A new look at design and possible protection. In *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts*, pp. 39-54, Stockholm., 1989.
- [17] BSI. Specification for protective helmets for vehicle users. Technical report, BS 6658:1985, British Standards Institution, 1985.
- [18] H. Vallée, C. Thomas, J. Sacrest, C. Henry, C. Tarrière, C. Got, and A. Patel. Characteristics of objects struck by the head of moped riders or motorcyclists. In *6th IRCOBI Conference on Biomechanics of Impacts*, pp. 99-109, Salon de Provence, France., 1981.
- [19] N. J. Mills and A. Gilchrist. Mathematical modelling of the effectiveness of helmets in head protection. In *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of impacts*, pp. 215-226, Bergisch Gladbach, Germany, 1988.
- [20] H. Kostner and U. W. Stocker. Mathematische analyse der stababsorption in schutzmaterial. *VDI-bericht*, vol. 657:pp. 211-244, 1987.
- [21] T. Gennarelli, L. Thibault, G. Tomei, R. Wisner, D. Graham, and J. Adams. Directional dependence of axonal brain injury due to centroidal and non-centroidal acceleration. In *Proceedings of 31st Stapp Car Crash Conference*, pp. 49-53. SAE Paper No. 872197, 1987.
- [22] J. Adams, D. Graham, and T. Gennarelli. Head injury in man and experimental animals: neuropathology. *Acta Neurochirurgica*, vol. 32:pp. 15-30, 1983.
- [23] A. L. Yettram, N. P. M. Godfrey, and B. P. Chinn. Materials for motorcycle crash helmets - a finite element parametric study. *Plastics rubber and composites: processing and applications.*, vol. 22 (Issue 4):pp. 215-222, 1994.
- [24] D. W. A. Brands, J. G. M. Thunnissen, and J. S. H. M. Wismans. Modelling head injury countermeasures: a 3d helmet model. *Proceedings of the AGARD Specialists, Meeting on Impact Head Injury*, no. 597:pp. 26-2-26-9. Advisory Group for Aerospace Research & Development., 1997.
- [25] Chih-Han Chang, Li-Tung Chang, Guan-Liang Chang, Shyh-Chour Huang, and Chiou-Hua Wang. Head injury in facial impact - a finite element analysis of helmet chin bar performance. *J. Biomech. Eng.*, 122(6):640-646, December 2000.
- [26] Li-Tung Chang, Guan-Liang Chang, Ji-Zhen Huang, Shyh-Chour Huang, De-Shin Liu, and Chih-Han Chang. Finite element analysis of the effect of motorcycle helmet materials against impact velocity. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 26:pp. 835-843, 2003.
- [27] R. Willinger, D. Baumgarten, B. Chinn, and E. Schuller. New dummy head prototype: development, validation and injury criteria. *International Journal of Crashworthiness*, vol. 6 (3):pp. 281-293, 2001.

- [28] Sándor Vincze-Pap and Zsombor Áfra. Comparative impact tests on helmets. *Lecture notes of the ICB Seminars*, Warsaw, Poland.:pp. nd, 2001.
- [29] B. P. Chinn, D. Doyle, D. Otte, and E. Schuller. Mottorcyclists head injury: Mechanisms identified from accident reconstruction and helmet damage replication. In *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts*, pp. 53-71, 1999.
- [30] P. Hallin, A. Gilchrist, and N. J. Mills. A new oblique impact test for mortorcycle helmets. *International Journal of Crashworthiness*, vol. 6 (1):pp. 53–64, 2001.
- [31] D. Otte, B. Chinn, D. Doyle, K. Sturrock, and E. Schuller. Accident description and analysis of motorcycle safety helmets. Technical report, COST 327 Project - Task Group: Accident Data, 1999.
- [32] F. Bednar, J. W. Billheimer, K. McRea, S. A. Sabol, J. Syner, and D. R. Thom. Motorcycle safety. Technical report, The National Academies, Transportation Research Board, 2000.
- [33] BSI. Specification for protective helmets for racing motorcyclists. Technical report, BS 1869:1952, British Standards Institution, 1952.
- [34] ANSI. Standard for protective headgear - for motor vehicle users. Technical report, ANSI Z90.1-1991 American National Standart Institute. Originated in 1966 as Z90.1-1966, 1991.
- [35] ISO-R1511. Protective helmets for road users. Technical report, International Standards Organisation., 1970.
- [36] NHTSA. Occupant crash protection - head injury criterion. Technical report, FMVSS 208, Docket Number 69-7, Notice 17, US Department of Transportation, 1972.
- [37] H. R. Lissner, M. Lebow, and F. G. Evans. Experimental studies on the relation between acceleration and intracranial pressure changes in man. *Surgery, Gynecology, and Obstetrics*, vol. 111:pp. 320–338, 1960.
- [38] E. S. et al. Gurdjian. Quantitative determination of acceleration and intracranial pressure in experimental head injury. *Neurology*, vol. 3:pp. 417–423, 1953.
- [39] E. S. Gurdjian, H. R. Lissner, and F. G. Evans. Intracranial pressure and acceleration accompanying head impacts in human cadavers. *Surgery, Gynecology and Obstetrics*, vol. 112:pp. 185–190, 1961.
- [40] L. M. Patrick, H. R. Lissner, and E. S. Gurdjian. Survival by design - head protection. In *Proceedings of the 7th Stapp Car Crash Conference*, pp. 485-499, 1965.
- [41] C. W. Gadd. Use of a weighted-impulse criterion for estimating injury hazard. In *Proceedings of 10th Stapp Car Crash Conference*, pp. 809-816, 1966.
- [42] A. Eiband. Human tolerance to rapidly applied accelerations: a summary of literature. Technical report, NASA Memorandum no. 5-19-59e, 1959.
- [43] J. J. Swearingen. Tolerances of the human face to crash impact. Technical report, Oklahoma: Office of Aviation Medicine, FAA, Civil Aeromedical Research Institute, 1965.
- [44] A. Slattenschek and W. Tauffkirchen. Critical evaluation of assessment methods for head impact applied in appraisal of brain injury hazard, in particular in head impact on windshields. In *1970 International Automobile Safety Conference Compendium*, pp. 1084-1112, 1970.

- [45] J. Versace. A review of the severity index. In *Proceedings of the 15th Stapp Car Crash Conference*, pp. 771-796. Also (MVSS208), 1971.
- [46] SAE. Human tolerance to impact conditions as related to motor vehicle design. Technical report, SAE J885 JUL86, Society of Automotive Engineers, Inc. (USA), 1986.
- [47] Tarriere. Head and neck injury criteria - a consensus workshop. Technical report, U. S. Dept. of Transport, NHTSA, Washington D.C. (USA), 1981.
- [48] P. Prasad, J. W. Melvin, D. F. Huelke, A. I. King, and G. W. Nyquist. Review of biomechanical impact response and injury in the automotive environment. Technical report, chap. 1 - Head. report no. DOT HS 807 042. U. S. Department of transport - NHTSA, Washington D. C., USA, 1985.
- [49] J. A. Newman. A generalized acceleration model for brain injury threshold (gambit). In *Proceedings of the 1986 International IRCOBI Conference, Bron, France. IRCOBI*, 1986.
- [50] J. A. Newman, C. Barr, M. Beusenbergh, E. Fournier, N. Shewchenko, E. Welbourne, and C. Withnall. A new biomechanical assessment of mild traumatic brain injury: Part 2 - results and conclusions. In *International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts*, pp. 223-233, Montpellier (France), 2000b.
- [51] J. A. Newman, N. Shewchenko, and E. Welbourne. A proposed new biomechanical head injury assessment function - the maximum power index. *Stapp Car Crash Journal*, vol. 44:pp. 215-222, 2000a.
- [52] F. A. Bandak. On the mechanics of impact neurotrauma: A review and critical synthesis. *Journal of Neurotrauma*, vol. 12(4):pp. 635-649, 1995.
- [53] F. A. Bandak. Impact traumatic brain injuries: A mechanical perspective. *Neurotraumatology: Biomechanic Aspects, Cytologic and Molecular Mechanisms*, vol. nd:pp. 58-83, 1997.
- [54] F. A. Bandak, A. X. Zhang, R. E. Tannous, F. DiMasi, P. Masiello, and R. Eppinger. Simon: A simulated injury monitor; application to head injury assessment. In *Proceedings of the 17th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles*, 2001.
- [55] RealCork. Anuario apcor 2009. Technical report, Cork Information Bureau - www.realcork.com, 2009.
- [56] APCOR and AIEC. Anuário da indústria corticeira portuguesa 2000. Technical report, Associação Portuguesa de Cortiça e Associação de Industriais e Exportadores de Cortiça., 2000.
- [57] M. Gouveia. Cortiça: uma indústria tradicional virada para o futuro. Technical report, Diário Económico, 18/6/2001; 2001.
- [58] R. Hooke. *Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses*. J. Martyn e J. Allestry, first edition edition, 1965.
- [59] S.P. Silva, M.A. Sabino, E.M. Fernandes, V.M. Correlo, L.F. Boesel, and R.L. Reis. Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*, vol. 50(6):pp. 345-365, December 2005.
- [60] M. A. Fortes, Rosa M. E., and H. Pereira. *A Cortiça*. IST Press, 2004.

- [61] C.P. Gameiro. *Capacidade de absorção de energia de impacto de estruturas tubulares com cortiça confinada - Estudo Numerico e Experimental*. PhD thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2007.
- [62] L. J. Gibson, K. E. Easterling, and M. F. Ashby. The structure and mechanics of cork. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences (1934-1990)*, vol. 377(1769):pp. 99–117, June 1981.
- [63] L. J. Gibson and M. F. Ashby. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press, 1997.
- [64] S. L. Dart and G. Eugene. Elastic properties of cork. i. stress relaxation of compressed cork. *Journal of Applied Physics*, vol. 17(5):pp. 314–318, 1946.
- [65] M. E. Rosa and M. A. Fortes. Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. *Journal of Materials Science*, vol. 23(3):pp. 879–885, March 1988.
- [66] M. Rosa and M. A. Fortes. Stress relaxation and creep of cork. *Journal of Materials Science*, vol. 23(1):pp. 35–42, January 1988.
- [67] J. F. Mano. The viscoelastic properties of cork. *Journal of Materials Science*, vol. 37(2):pp. 257–263, January 2002.
- [68] J.F. Mano. Creep-recovery behaviour of cork. *Materials Letters*, vol. 61(11-12):pp. 2473–2477, May 2007.
- [69] H. Pereira. Chemical composition and variability of cork from quercus suber l. *Wood Science and Technology*, vol. 22(3):pp. 211–218, September 1987.
- [70] P. Pina and M. Fortes. Characterization of cells in cork. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 29(9):pp. 2507–2514, 1996.
- [71] H. Pereira, J. Graça, and C. Baptista. The effect of growth-rate on the structure and compressive properties of cork. *IAWA Bulletin*, vol. 13:pp. 389–396, 1992.
- [72] M. A. Fortes and M. E. Rosa. Growth stresses and strains in cork. *Wood Science and Technology*, vol. 26(4):pp. 241–258, May 1992.
- [73] A. Costa, H. Pereira, and A. Oliveira. Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production. *Forest Ecology and Management*, vol. 175(1-3):pp. 239–246, March 2003.
- [74] A. Costa, M. Madeira, and Â. C. Oliveira. The relationship between cork oak growth patterns and soil, slope and drainage in a cork oak woodland in southern portugal. *Forest Ecology and Management*, vol. 255(5-6):pp. 1525–1535, April 2008.
- [75] O. Anjos, P. Pina, and M. E. Rosa. Comportamento mecânico da cortiça em compressão e sua relação com a porosidade. *Actas do European conference on cork oak and cork*, vol. n.d.:pp. 317–325, 1997.
- [76] M. F. Vaz and M. A Fortes. Friction properties of cork. *Journal of Materials Science*, vol. 33(8):pp. 2087–2093, April 1998.
- [77] J.N. Marat-Mendes and E.R. Neagu. The study of electrical conductivity of cork. *Ferroelectrics*, vol. 294(1):pp. 123–131, April 2003.

- [78] M.E. Rosa, J. Osorio, and V. Gree. Torsion of cork under compression. *Materials Science Forum*, vol. 455-456:pp. 235–238, April 2004.
- [79] A. D. Parralejo, F. Guiberteau, M.A. Fortes, and M.E. Rosa. Mechanical properties of cork under contact stresses. *Revista de Metalurgia*, vol. 37:pp. 330–335, 2001.
- [80] M. A. Fortes and M. E. Rosa. Compressão cíclica de cortiça. *Actas do Materiais*, vol. 2:pp. 321–334, 1987.
- [81] M. E. Rosa and M. A. Fortes. Deformation and fracture of cork in tension. *Journal of Materials Science*, vol. 26(2):pp. 341–348, January 1991.
- [82] M. Rosa and M. Fortes. Water absorption by cork. *Wood and Fiber Science*, vol. 25(4):pp. 339–348, October 1993.
- [83] A. M. Gil, M. H. Lopes, C. Pascoal Neto, and P. T. Callaghan. An nmr microscopy study of water absorption in cork. *Journal of Materials Science*, vol. 35(8):pp. 1891–1900, April 2000.
- [84] M. A. Fortes and M. T. Nogueira. The poisson effect in cork. *Materials Science and Engineering*, vol. A122:pp. 227– 232, 1989.
- [85] L. Gil. Effect of hot pressing densification on the cellular structure of black agglomerated cork board. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 52(2):pp. 131–134, April 1994.
- [86] L. Gil. Densification of black agglomerate cork boards and study of densified agglomerates. *Wood Science and Technology*, vol. 30(3):pp. 217–223, June 1996.
- [87] J. Teixeira, A. C. Fernandes, B. R. Saramago, M. Emilia, and J. C. Bordado. Influence of the wetting properties of polymeric adhesives on the mechanical behaviour of cork agglomerates. *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 10(17):pp. 1111–1127, April 1996.
- [88] V. Gómez-Serrano, A. Macias-Garcia, A. Díaz-Parralejo, and P. Rosa-Blanco. A study on the density of agglomerates prepared from cork wastes. *Journal of Materials Sciences & Technology*, vol. 19(1):pp. 46–50, April 2003.
- [89] P. J. R. O. Nóvoa, M. C. S. Ribeiro, A. J. M. Ferreira, and A. T. Marques. Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates. *Composites Science and Technology*, vol. 64(13-14):pp. 2197–2205, October 2004.
- [90] R. C. S. Carvalho e Silva. Melhoria da resposta sísmica de edifícios com recurso a paredes de corbe. Master's thesis, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, 2008.
- [91] H. Pereira. *Cork: Biology, Production and Uses*. Elsevier Science, 2007.
- [92] C.P. Gameiro, J. Cirne, G. Gary, V. Miranda, J. Pinho da Cruz, and F. Teixeira-Dias. Numerical and experimental study of the dynamic behaviour of cork. In Filipe Teixeira-Dias, Bradley Dodd, Erhardt Lach, and Peter Schulz, editors, *Design and Use of Light-Weight Materials*, pages 65–84. Proc. of the 3rd Light-Weight Armour Group Workshop: Design and Use of Light-Weight Materials, September 2005.
- [93] C. Gameiro, J. Cirne, and G. Gary. Experimental study of the quasi-static and dynamic behaviour of cork under compressive loading. *Journal of Materials Science*, vol. 42(9):pp. 4316–4324, June 2007.

-
- [94] C.P. Gameiro and J. Cirne. Dynamic axial crushing of short to long circular aluminium tubes with agglomerate cork filler. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 49(9):pp. 1029–1037, September 2007.
- [95] C. P. Gameiro, J. Cirne, V. Miranda, J. Pinho-da Cruz, and F. Teixeira-Dias. Dynamic behaviour of cork and cork-filled aluminium tubes: Numerical simulation and innovative applications. *Holzforschung*, vol. 61(4):pp. 400–405, 2007.
- [96] M. P. Santos. Aplicação estrutural de cortiça para melhoria da segurança passiva em caso de impacto. Master's thesis, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, 2008.
- [97] N.J. Mills, S. Wilkes, S. Derler, and A. Flisch. Fea of oblique impact tests on a motorcycle helmet. *International Journal of Impact Engineering*, In Press, Corrected Proof:1–13, 2008.