

# Análise da Deformação de Capacetes de Moto recorrendo ao Método de Elementos Finitos

Alessandro Santos<sup>1</sup>, Jorge Belinha<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 1120198@isep.ipp.pt; R. Dr. António Bernardino de Almeida 431; Porto; Portugal

<sup>2</sup> job@isep.ipp.pt; R. Dr. António Bernardino de Almeida 431; Porto; Portugal

## Resumo

O capacete é um dos principais equipamentos de proteção de um motociclista sendo, inclusive, o único equipamento obrigatório por lei em Portugal. No entanto, face à grande quantidade de modelos existentes, torna-se muitas vezes um tema de grandes dúvidas no que toca à segurança oferecida. Ao longo do presente estudo, foi realizada uma análise do comportamento estrutural de dois tipos distintos de modelos de capacete, submetidos a uma força resultante de uma colisão. Esta análise foi realizada utilizando o Método de Elementos Finitos, possibilitando a avaliação da deformação dos capacetes face a uma força externa. Para tal, foram selecionados dois modelos de capacetes, um fechado e um aberto, considerando-se como material de fabrico um polímero de policarbonato com ABS, cujo módulo de Young corresponde a 2 600 MPa e o coeficiente de Poisson 0,353. No que toca à colisão simulada, foi assumido um impacto lateral de 45 graus com uma força resultante de 1 776 N. Foram ainda definidas as condições de fronteira essenciais do modelo em todos os eixos na base do capacete. Após este processo foi realizada a análise de elementos finitos que permitiu determinar o deslocamento e a tensão de von Mises resultantes da força aplicada. Verificou-se que o capacete fechado oferece melhor proteção, tendo apresentado uma maior resistência à deformação, derivado da proteção da mandíbula. Os resultados obtidos foram positivos, indo de encontro a resultados de estudos anteriores.

## Article Info

### Keywords

Método de Elementos Finitos  
Deformação em capacetes  
Policarbonato com ABS

### Article History

Received: dd/mm/yyyy  
Revised: dd/mm/yyyy  
Accepted: dd/mm/yyyy

## 1. Introdução

Segundo a Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, em 2023 foram registados 8 936 acidentes envolvendo motociclos em Portugal. Destes, destacam-se as 124 vítimas mortais, os 766 feridos graves e os 8 384 feridos leves, totalizando 9 274 vítimas. Importa ainda referir que estes números têm aumentado consideravelmente nos últimos anos, apresentando um crescimento de 17,3% em comparação com 2022 [1]. A redução destes números passa principalmente pelo próprio condutor, quer pela adoção de bons comportamentos, como pela utilização de equipamentos de segurança adequados. De todos os equipamentos de proteção disponíveis, importa destacar o capacete, um dos equipamentos mais importantes que protege um dos principais órgãos do corpo humano: o cérebro.

No momento de comprar um capacete, um motociclista vê-se perante uma panóplia de ofertas de modelos distintos que se dividem primariamente em duas categorias: capacetes fechados ou abertos. Para além do formato, existe ainda a questão do material utilizado na fabricação do capacete. Ambos os fatores afetam em grande medida a proteção oferecida, tratando-se de questões importantes a considerar na escolha de um capacete [2].

Desta forma, para o presente trabalho deseja-se realizar uma análise do comportamento estrutural de ambos os modelos de capacete, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), aquando da aplicação de uma força externa resultante de, por exemplo, um acidente.

Os MEF permitem o estudo da tensão e deformação de um qualquer corpo sujeito a forças externas. Estes métodos surgiram na década de 60, tendo a sua utilização aumentado com o desenvolvimento dos computadores. Na atualidade, estas ferramentas são utilizadas na análise de inúmeros problemas das mais diversas áreas, desde a engenharia civil à biomédica [3]. Com isto, torna-se relevante e interessante a aplicação destes métodos no estudo estrutural dos capacetes, de forma a compreender como a sua composição e formato afetam a transmissão da força para a cabeça do utilizador. A literatura existente sobre este tópico foca-se normalmente em dois grandes temas. O primeiro passa pela análise dos materiais utilizados, onde as principais conclusões indicam a necessidade de, numa primeira fase dissipar e em seguida absorver a força do impacto [4], [5]. O segundo passa pela análise do modelo do capacete, onde se verifica que os capacetes fechados oferecem melhor proteção ao impacto para a cabeça do utilizador [6], [7].

Ao longo do presente documento, é apresentado ao leitor todo o estudo analítico realizado. Na secção 2 é apresentada a metodologia de trabalho e materiais utilizados. Na secção 2.1 são apresentados todos os conceitos teóricos essenciais para a compreensão dos MEF, enquanto na secção 2.2 é apresentado o modelo desenvolvido. Na secção 3 são apresentados os resultados obtidos durante a análise dos elementos finitos, sendo seguida, pela respetiva análise e interpretação. Por último, na secção 4 são apresentadas as conclusões obtidas, assim como principais limitações e trabalho futuro a executar.

## 2. Metodologia e Materiais

Nesta secção é apresentada a metodologia de trabalho seguida, assim como os materiais utilizados. Na secção 2.1 são apresentados os conceitos teórico dos MEF, enquanto na secção 2.2 são apresentados os modelos selecionados e os passos executados para realizar a análise de elementos finitos.

### 2.1. Método dos Elementos Finitos

No âmbito da engenharia biomédica, é muitas vezes relevante o estudo do comportamento estrutural de corpos como os órgãos, tecidos, próteses, equipamentos de proteção e muitos outros. Para esta análise, existem diversas ferramentas, das quais se destacam os Métodos de Elementos Finitos que utilizam técnicas numéricas para discretizar o contínuo.

O princípio por detrás do MEF é baseado na divisão de um corpo complexo em partes mais pequenas, conhecidas como elementos finitos. Cada um destes elementos, cujo conjunto é uma malha, é composto por vários pontos de integração. Aquando da ação de uma força na malha, o deslocamento dos pontos é calculado pelo MEF com recurso a funções de forma. Quando derivadas, estas funções permitem determinar novas soluções, ou seja, os deslocamentos, a partir dos pontos discretos [3]. A conversão entre as coordenadas cartesianas utilizadas localmente (pelos elementos finitos) e globalmente (pela estrutura/corpo 3D), assim como o processo inverso, é feita através da matriz de transformação, também conhecida como matriz Jacobiana. O determinante desta matriz corresponde à razão entre o volume do elemento finito e o volume do corpo [8].

Para a compreensão dos MEF é essencial dominar os conceitos de tensão e deformação. A tensão refere-se às forças que atuam sobre o corpo, em particular, nos pontos de integração. Quanto à deformação, esta descreve de que forma o componente se deforma através dos deslocamentos [3].

A relação entre a deformação e o deslocamento de cada ponto é dada através da matriz de deformação. Quanto à interação entre cada ponto da malha, esta é determinada a partir da matriz de rigidez. Cada um destes pontos possui uma matriz de rigidez individual, que deve ser combinada numa matriz global, processo conhecido como assemblagem. Num cenário a três dimensões, cada ponto possui três graus de liberdade, cujos valores alteram a partir da aplicação de forças externas [8].

O módulo de Young, o coeficiente de Poisson, as dimensões de cada elemento e outras propriedades mecânicas do material também devem ser consideradas de forma a determinar como cada ponto se move em relação aos seus vizinhos. Para tal, recorre-se à relação entre a tensão e deformação, representada na matriz constitutiva. A partir das deformações e da matriz constitutiva é possível calcular as tensões recorrendo à lei de Hook [9].

Outro fator a considerar nos MEF são as forças aplicadas ao modelo. Para descrever estas forças é utilizado um vetor que permite determinar a direção da força, assim como a respetiva intensidade. A relação entre a força aplicada ( $F$ ), o deslocamento ( $U$ ) e a matriz de rigidez ( $K$ ) é dada através da Eq. (1) [9].

$$F = K \times U \quad (1)$$

Esta equação pode ser resolvida em ordem a  $U$ , permitindo a determinação dos deslocamentos a partir da matriz inversa de rigidez e da força aplicada, como representado na Eq. (2). Muitas implementações de MEF utilizam o método da eliminação Gaussiana para a resolução desta equação [9].

$$U = K^{-1} \times F \quad (2)$$

Na especificação do modelo é também importante definir as condições de fronteira, que podem ser vistas como as condições que definem os limites do modelo. De uma forma simples, definem as áreas do modelo que são imóveis, sendo que esta imobilidade pode ser definida ao nível de cada eixo. Este processo implica que na matriz de rigidez, os respetivos valores sejam colocados a zero [9]. Muitas das vezes estas restrições vão originar as chamadas forças de reação, que devem ser consideradas no modelo e na respetiva análise de elementos finitos.

2.2. Modelo

Como previamente referido, para o presente estudo deseja-se avaliar o comportamento estrutural de dois modelos de capacetes distintos perante forças externas. Para tal, foram selecionados dois modelos de capacete, um fechado que envolve por completo a cabeça do utilizador, protegendo o crânio e a mandíbula, e um aberto que tradicionalmente apenas protege o crânio.

Após uma pesquisa num repositório de modelos 3D, foi selecionado um modelo STL de um capacete fechado [10], apresentado na Fig. 1(a). Numa primeira fase, procedeu-se à simplificação da malha do capacete, processo que passa pela redução de vértices e triângulos do modelo com o objetivo de facilitar o seu processamento. De seguida, foi realizado um corte na base do capacete para posteriormente ser mais simples de adicionar uma condição de fronteira. Por fim, foi executada uma ferramenta de análise de erros na malha, realizando-se a correção automática dos erros identificados. O produto resultante destes passos encontra-se na Fig. 1(b). Em seguida, foi removido o protetor da mandíbula, originando o modelo do capacete aberto apresentado na Fig. 1(c). Este processo permitiu manter a parte superior do capacete igual nos dois modelos, o que possibilita uma melhor comparação do comportamento dos modelos durante a análise dos elementos finitos. Todos estes passos foram realizados no Autodesk Meshmixer.

O modelo resultante dos passos acima descritos é apenas uma malha, sendo necessário criar o modelo de elementos finitos a partir desta. Para tal, foi utilizado o Femap, originando um ficheiro no formato INP a utilizar na posterior análise dos elementos finitos.

De destacar que o modelo original possuía 7 978 vértices e 15 622 triângulos sendo que, após este processo, o modelo do capacete fechado ficou com 1 268 vértices e 2 540 triângulos e o modelo aberto com 1 074 vértices e 2 148 triângulos.

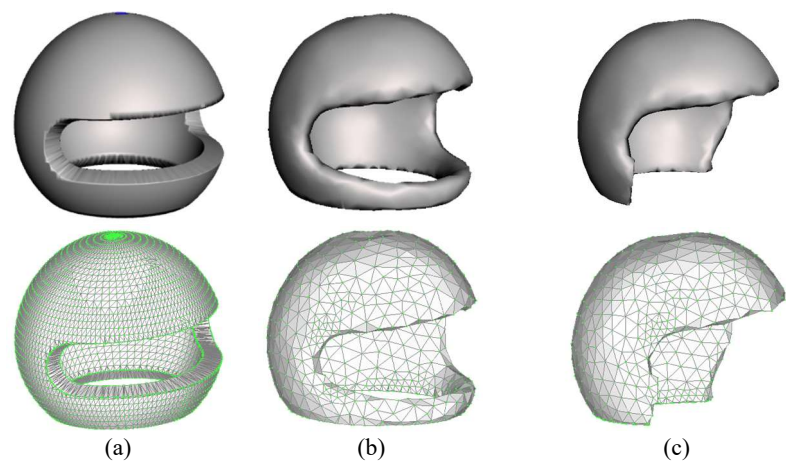


Fig. 1 – (a) modelo original; (b) modelo final do capacete fechado; (c) modelo final do capacete aberto.

No que toca à composição dos capacetes, verificou-se que estes são normalmente constituídos por duas camadas principais: a calota ou casco exterior, cuja função é receber e dissipar a força por toda a estrutura; e a parte interna, que normalmente procura absorver a força do impacto, de forma a impedir a sua transmissão à cabeça do utilizador [7]. Para o âmbito do presente trabalho foi apenas considerada a camada exterior do capacete, tendo por isso sido utilizada uma única camada constituída por um polímero de policarbonato com ABS, um material comum no fabrico da calota [2].

Após a seleção do material, foi necessário identificar as suas propriedades mecânicas para a realização da análise de elementos finitos. Para tal, fez-se uma pesquisa bibliográfica para encontrar o módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do policarbonato com ABS [11]. Estes dados encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do policarbonato com ABS

Propriedade	Valor médio	Intervalo de Referência
E (MPa)	2 600	[1 670 – 11 100]
$\nu$	0,353	[0,340 – 0,380]

Foi também necessário definir as condições das fronteiras essenciais do modelo desenvolvido. Essa fronteira foi definida na base do capacete, tendo-se aplicado uma restrição em todos os eixos.

Quanto à determinação das forças a aplicar no modelo, foi necessário definir uma intensidade e uma direção. Para a intensidade, foi considerado um cenário onde o capacete embate contra uma parede. Recorrendo à segunda lei de Newton,

que diz que a força ( $F$ ) corresponde ao produto da massa ( $m$ ) com a aceleração ( $a$ ), é possível calcular a força a aplicar no capacete [12].

Assumindo as seguintes condições:

1. O capacete deslocava-se à velocidade de 40 Km/h, ou 11,11 m/s ( $\Delta v$ );
2. O corpo parou por completo ao fim de 0,05 segundos ( $\Delta t$ );
3. A massa do capacete é de 3 Kg e da cabeça é 5 Kg, totalizando 8 Kg.

É possível determinar o valor da força resultante a considerar. A partir da Eq. (3) e das condições 1 e 2 determinou-se que a aceleração do capacete é de -222 m/s. Consequentemente, a partir da Eq. (4) e da condição 3 determinou-se que a força a aplicar é de 1 776 N.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (3)$$

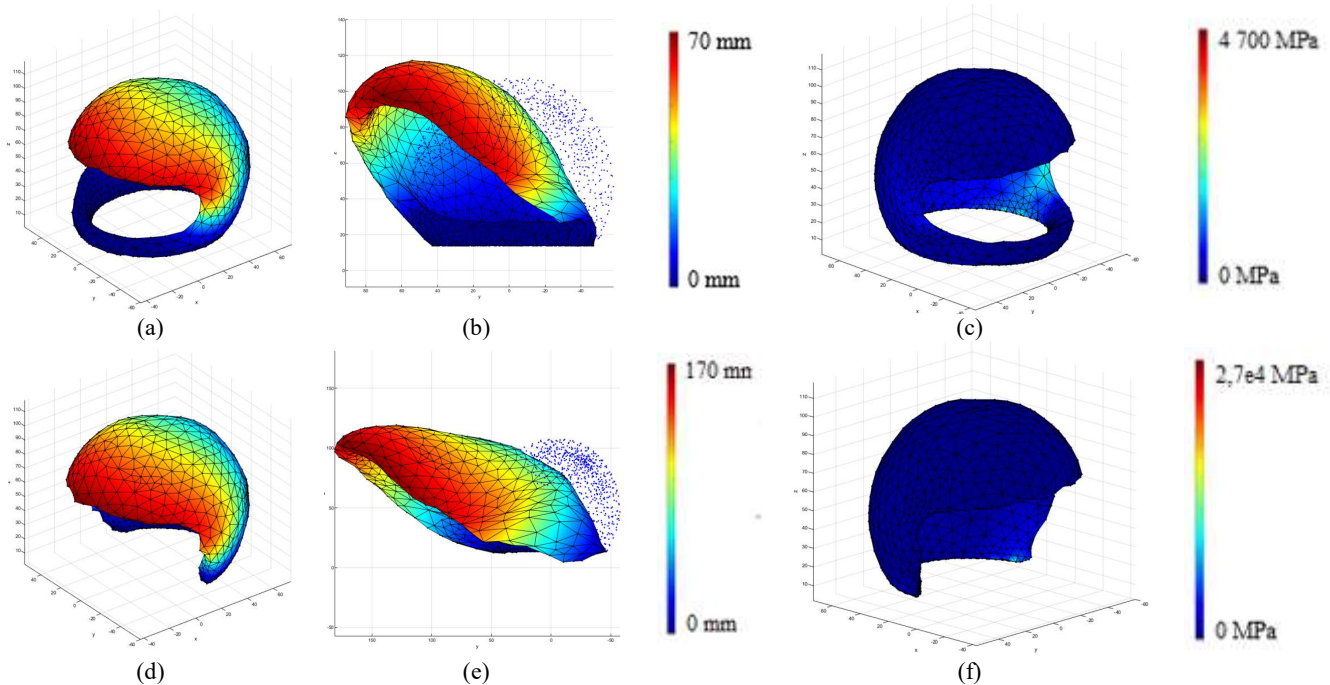
$$F = m \times a \quad (4)$$

Quanto à direção da força, foi considerado o manual de homologação de capacetes da Federação Internacional de Motociclismo [13]. Este manual é particularmente interessante para o presente trabalho por especificar com grande detalhe todos os testes e respetivas condições que qualquer capacete homologado deve cumprir. No entanto, para o âmbito do presente projeto apenas foi considerado um dos cinco cenários disponíveis: o do impacto lateral de 45 graus.

A partir de todas as informações apresentadas (o ficheiro INP, as propriedades mecânicas do material, as condições de fronteira e as forças externas), foi então possível realizar a análise de elementos finitos. Para tal, todos estes dados foram disponibilizados ao FEMAS, procedendo-se à respetiva análise. Os resultados e respetiva análise são apresentados na secção 3.

### 3. Resultados e Discussão

Nesta secção são apresentados os resultados da análise realizada no FEMAS, assim como a respetiva discussão. Na Fig. 2 é possível encontrar as intensidades dos deslocamentos, os respetivos deslocamentos e as tensões de *von Mises* do capacete fechado e aberto.



**Fig. 2** – (a,d) intensidade do deslocamento; (b,e) intensidade do deslocamento e respetivo deslocamento; (c,f) tensões efetivas de *von Mises* do capacete fechado (em cima) e aberto (em baixo).

De forma a comparar o modelo de capacete aberto com o modelo fechado, foram extraídos os dados de seis pontos pertencentes ao plano laranja e seis pontos pertencentes ao plano azul, visíveis na Fig. 4(a). A localização exata dos pontos encontra-se representada na Fig. 4(b) e Fig. 4(c). Este passo foi realizado para ambos os modelos, totalizando 12 pontos e permitindo a construção das tabelas da Fig. 5.

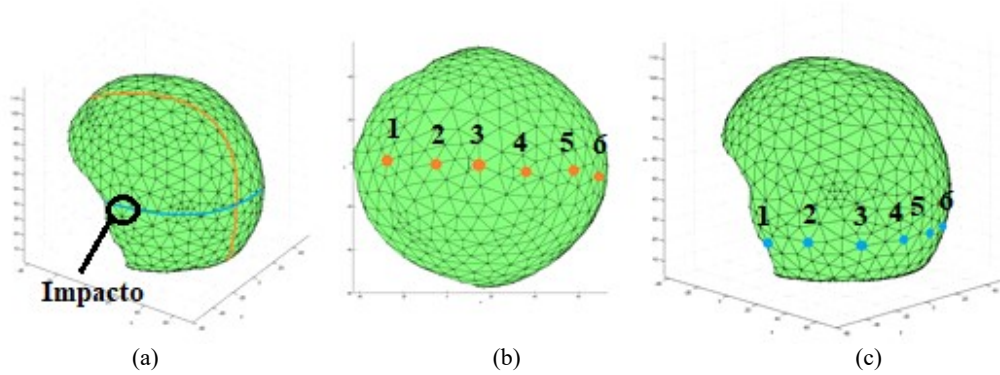


Fig. 3 – Localização dos pontos utilizados na comparação entre o modelo fechado e aberto.

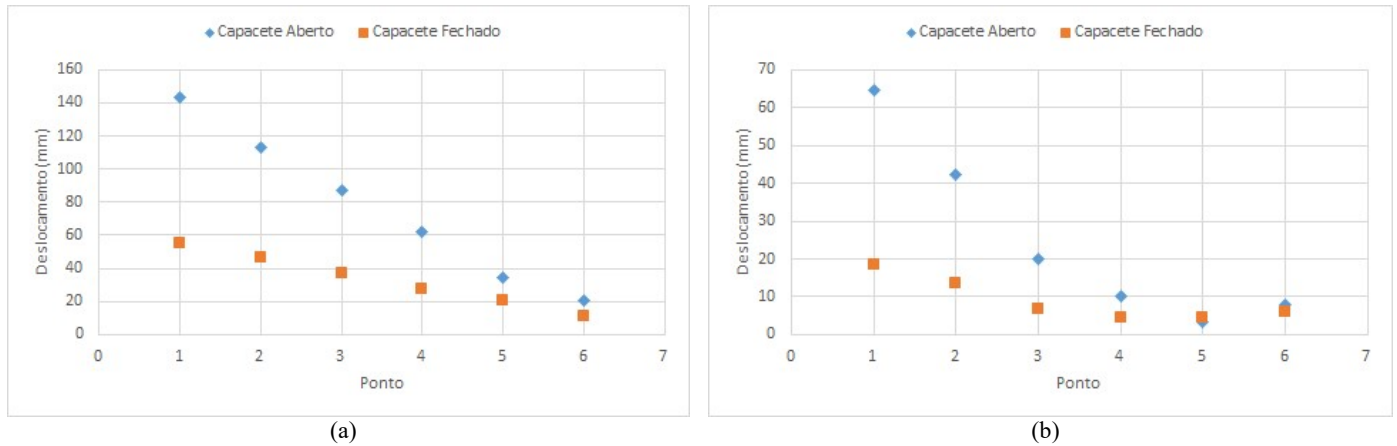


Fig. 4 – (a) deslocamentos obtidos nos pontos do plano vertical (laranja); (b) deslocamentos obtidos nos pontos do plano horizontal (azul);

Considerando os resultados obtidos, é possível concluir que o deslocamento resultante da força aplicada apresenta uma magnitude superior no capacete aberto. Tal pode ser comprovado através dos mapas de cor representados na Fig. 2, onde se verifica que na Fig. 2(b), que representa o capacete fechado, o deslocamento máximo é de 70 mm, enquanto na Fig. 2(e), que representa o capacete aberto, o deslocamento máximo é de 170 mm. Também se pode retirar a mesma conclusão através da análise das tabelas apresentadas na Fig. 5(a) e Fig. 5(b), onde se verifica que o conjunto de pontos referentes ao capacete aberto apresentam sempre um deslocamento superior.

A Fig. 5(a) permite ainda afirmar que à medida que nos afastamos da parte frontal de qualquer capacete, o valor do deslocamento diminui. Na Fig. 5(b) verificamos também que ao longo da base, próximo da condição de fronteira essencial definida, à medida que nos afastamos do local onde foi aplicada a força, o deslocamento também diminui.

Quanto às tensões efetivas de *von Mises*, através da Fig. 5(c), Fig. 5(f) e dos dados gerados na análise de elementos finitos, verifica-se que o valor máximo da tensão efetiva no capacete aberto é de 28 756 MPa, enquanto no capacete fechado este máximo é de 4 873 MPa.

Os resultados obtidos foram também comparados com resultados de outros estudos. No trabalho de Huda *et al* [7], os autores verificaram que os deslocamentos e tensões efetivas de *von Mises* também foram superiores no capacete aberto, chegando à conclusão que o capacete fechado oferece melhor proteção. Apesar de não ser possível comparar os valores em si, por não ter sido possível replicar as condições do estudo, as conclusões obtidas são idênticas às deste trabalho, apresentadas na secção 4.



#### 4. Conclusão

Ao longo do presente trabalho foi possível analisar o comportamento estrutural de dois modelos de capacete distintos. Para tal, foi utilizada uma análise de elementos finitos, que permitiu avaliar a deformação e tensões efetivas de *von Mises* a que ambos os modelos de capacete estiveram sujeitos quando aplicada uma força externa. Para possibilitar a comparação dos resultados obtidos, as condições da simulação realizada foram replicadas, desde as propriedades mecânicas do material utilizado, às características da força aplicada.

Verificou-se que o capacete fechado esteve sujeito a deformações e tensões menores que o capacete aberto. Considerando que as condições das análises realizadas para ambos os capacetes foram idênticas, e que a única diferença entre os modelos é a parte inferior, mais concretamente, a proteção da mandíbula do capacete fechado, é possível concluir que a existência deste é um fator positivo na redução da deformação do capacete e consequentemente uma característica desejável em qualquer capacete.

É importante referir que o modelo desenvolvido apresenta uma grande limitação no que toca às condições de fronteira essenciais utilizadas, assumindo uma fronteira que pode não ser a mais correta. Este fator pode afetar em grande medida a validade dos resultados obtidos, traduzindo-se num modelo que não corresponderá à realidade.

No que toca aos próximos passos do presente estudo, estes passariam em primeiro lugar pela resolução da limitação identificada. De seguida, poderia ser interessante introduzir um novo modelo de capacete na análise realizada: o capacete modular. Este modelo é similar a um capacete fechado, no entanto, permite a sua abertura através de um componente modular, o que significa que o casco do capacete não é constituído por uma única peça. Este fator pode introduzir variações que podem apresentar resultados interessantes. Outro ponto que poderia ser avaliado seria a utilização de vários materiais no modelo, assim como a análise de materiais distintos. Por fim, seria também importante o modelo utilizado incluir um corpo no seu interior que representasse a cabeça, permitindo o estudo da transmissão das forças para a mesma.

Em suma, considera-se todo o trabalho realizado positivo, tendo os resultados obtidos chegado às mesmas conclusões doutros estudos prévios. Considera-se que o presente estudo seja uma boa base para continuar investigações nesta área, em particular se abordados os pontos identificados a trabalhar no futuro.

#### Referências

- [1] Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, “Relatório Anual 2023 - Sinistralidade em Portugal,” Barcarena, 2024.
- [2] M. Obst, S. Rzepczyk, S. Glowinski e C. Zaba, “Motorbike protective helmets, construction, testing and its influence on the type and severity of injuries of motorbike accident casualties: a literature review,” *Vibrations in Physical Systems*, vol. 34, n.º 1, 2023.
- [3] Á. F. M. Azevedo, “Método dos Elementos Finitos,” Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [4] X. Zhang, B. Yang, J. Wu, X. Li e R. Zhou, “Research Progress on Helmet Liner Materials and Structural Applications,” *Materials*, vol. 17, n.º 11, 2024.
- [5] Y. Kumar, S. Khan e A. Mourad, “Role of ABS and EPS foams in determining the performance of motorcyclist helmet during impact loading,” *International Journal of Crashworthiness*, 2023.
- [6] M. Tabary, S. Ahmadi, M. Amirzade-Irani, M. Shojaei, M. Asl, Z. Ghodsi, A. Azarhomayoun, A. Ansari, R. Atlasi, F. Araghi, M. Shafieian, S. Heydari, M. Sharif, G. Reilly e V. Rahimi, “The effectiveness of different types of motorcycle helmets – A scoping review,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 154, 2021.
- [7] A. Huda e M. S. Salwani, “Impact Analysis of Motorcycle Helmet: Finite Element Modeling,” em *Proceedings of the 2nd Human Engineering Symposium: HUMENS 2023*, Pahang, 2023.
- [8] P. Seshu, *Textbook of Finite Element Analysis*, New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2012.
- [9] Z. Sams, “Real-Time Deformation using a Modified Finite Element Method,” Bournemouth University, Bournemouth, 2015.
- [10] Rixtronix LAB, “Helmet Full Face V1.2,” 12 Março 2020. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:4217010/files>.
- [11] MatWeb, “Overview of materials for Polycarbonate/ABS Alloy, Unreinforced,” 2024. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/>.
- [12] P. Dyke e R. Whitworth, “Collisions,” em *Guide to Mechanics*, London, The MacMillan Press, 1992, p. 93–118.
- [13] FIM, “FIM Racing Homologation Programme For Helmets,” FIM, Mies, 2019.